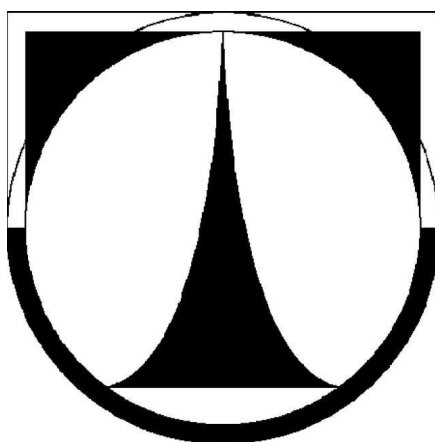


Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení



Bakalářská práce

Návrh a konstrukce termoakustického zařízení

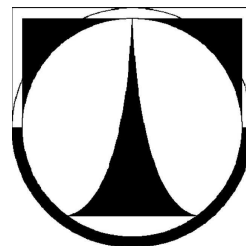
(The Design and Construction of a Thermoacoustic Device)

Jakub Kolouch

Liberec 2012



**TECHNICKÁ UNIVERZITA
V LIBERCI**



Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení

Studijní program: bakalářský – B2341 Strojírenství

Obor: 2302R022 Stroje a zařízení

Zaměření: Energetické stroje a zařízení

Jakub Kolouch

Návrh a konstrukce termoakustického zařízení

(The Design and Construction of a Thermoacoustic Device)

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Novotný

Rozsah práce

Počet stran: 43

Počet obrázků: 16

Počet grafů: 1

Počet příloh: 12

V Liberci 3. ledna 2012



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Jakub Kolouch
Studijní program	bakalářský – B2341 Strojírenství
Obor	2302R022 Stroje a zařízení
Zaměření	Energetické stroje a zařízení

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Návrh a konstrukce termoakustického zařízení

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Analýza stávajícího stavu poznatku, teorie termoakustického jevu.
2. Návrh topného a chladicího elementu, výpočet topného a chladicího výkonu.
3. Konstrukce termoakustického zařízení, příprava výrobní dokumentace, zajištění výroby.

Forma zpracování diplomové práce:

- původní zpráva: 35 stran
- grafické práce: cca.10 stran příloh

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

Lienhard, J.H., Lienhard, J.H.: A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, MIT, 2005
Rieger, F., Šesták, J.: Přenos hybnosti, tepla a hmoty, 1996, Vydavatelství ČVUT Praha
<http://www.lanl.gov/thermoacoustics/>

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Novotný

L. S.

doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL), nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji – li bakalářskou práci, nebo poskytnu – li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci 3. ledna 2012

Podpis.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli s tvorbou mé bakalářské práce. Zvláště pak doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. a Ing. Petru Novotnému za konzultace, trpělivost a společnou práci v laboratořích naší katedry, a dále mému otci a bratru za podporu a pomoc při stavbě zařízení a rovněž při mých studiích.

Abstrakt

Úkolem této bakalářské práce je navrhnout jednoduchý termoakustický stroj umožňující měření různých veličin. V práci je uvedena teorie termoakustického jevu, rozbor možných provedení, výpočty, poznatky z měření a výkresová dokumentace. Inspirace a některé poznatky potřebné k návrhu tohoto stroje byly získány na malém termoakustickém stroji v laboratořích naší katedry energetických zařízení.

Klíčová slova

Termoakustický motor, stack, rezonátor, chladič, tepelný oběh

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to propose a simple thermoacoustic device, that allows measurement of different variables. In this work there is stated a theory of the thermoacoustic phenomenon, an analysis of possible alternatives, calculations, the knowledges of the measurement and drawing documentation. The inspiration and some information needed to the design of this machine were obtained on a small thermoacoustic machine in the laboratories of our energy facilities department.

Key words

Thermoacoustic engine, Stack, resonator, cooler, thermodynamic cycle

Obsah

Úvod.....	9
Historie.....	10
1. Teorie termoakustického jevu.....	10
1.1. Podoby termoakustických zařízení.....	10
1.2. Princip termoakustického motoru.....	11
1.3. Princip termoakustického tepelného čerpadla.....	12
1.4. Konstrukce keramiky (stacku).....	13
1.5. Popis stojatého vlnění.....	16
1.6. Termodynamické zákonitosti termoakustického jevu.....	18
2. Návrh zařízení.....	21
2.1. Účel zařízení.....	21
2.2. Požadované parametry a vlastnosti.....	22
2.3. Možnosti provedení.....	23
2.4. Výběr varianty.....	23
2.5. Popis zařízení.....	27
3. Výpočty.....	29
3.1. Všeobecné výpočty.....	29
3.2. Výpočet topného výkonu.....	31
3.3. Výpočet chladicího výkonu.....	32
4. Získané poznatky.....	37
5. Měření.....	39
Potřebná technika a programy.....	40
6. Závěr.....	41
Literatura.....	42

Seznam použitých symbolů:

δ_K	$[m]$	tepelná penetrační hloubka
k	$[W/(m \cdot K)]$	tepelná vodivost vzduchu
ρ	$[kg/m^3]$	hustota
c_p	$[J/(Kg \cdot K)]$	měrná tepelná kapacita izobarická
c_v	$[J/(Kg \cdot K)]$	měrná tepelná kapacita izochorická
ω	$[rad/s]$	úhlová frekvence
ν	$[m^2/s]$	kinematická viskozita
η	$[Pa \cdot s]$	dynamická viskozita
$\sigma(Pr)$	$[1]$	Prandtlovo číslo
r_h	$[m]$	hydraulický poloměr
δ_v	$[m]$	viskózní penetrační hloubka
N_L	$[1]$	Lautrecovo číslo
λ	$[m]$	vlnová délka
L	$[dB]$	hladina akustického tlaku
p	$[Pa]$	tlak
f	$[Hz]$	frekvence
l	$[m]$	délka rezonátoru
κ	$[1]$	Poissonova konstanta
R	$[J/(mol \cdot K)]$	molová plynová konstanta
T	$[K]$	termodynamická teplota
M	$[kg/mol]$	molekulová hmotnost
c	$[m/s]$	rychlost zvuku
V	$[m^3]$	objem
u	$[m/s]$	rychlost
k	$[m^{-1}]$	akustické vlnové číslo
η	$[1]$	účinnost
l_s	$[m]$	výška stacku

ΔT_m	$[K]$	Rozdíl teplot mezi horní a spodní rovinou stacku
∇T_{crit}	$[K / m]$	kritický teplotní gradient
q	$[J / Kg]$	měrné teplo
a	$[m^2 / s]$	teplotní vodivost
S_M	$[m^2]$	plocha malého termoakustického motoru
S_V	$[m^2]$	plocha velkého termoakustického motoru
P_P	$[W / m^2]$	plošný výkon
P_M	$[W]$	výkon malého termoakustického motoru
P_V	$[W]$	výkon velkého termoakustického motoru
\dot{Q}	$[W]$	tepelný výkon chladiče
A	$[m^2]$	teplosměnná plocha
t_{1s}	$[^{\circ}C]$	logaritmická střední hodnota rozdílu teplot médií
α	$[W / (m^2 \cdot K)]$	součinitel přestupu tepla
λ	$[W / (m \cdot K)]$	součinitel tepelné vodivosti
K	$[W / (m^2 \cdot K)]$	součinitel prostupu tepla

Zkratky:

TZ	Termoakustické zařízení
TM	Termoakustický motor
TTČ	Termoakustické tepelné čerpadlo

Úvod:

Věda a technika, zabývající se získáváním energie a její přeměnou je pro chod lidstva nezbytností a je vlastně tahounem veškerého pokroku. Odjakživa se lidé pokoušeli ulehčit si vlastní práci použitím např. domácích zvířat, později pomocí větrné a vodní síly. V nynější době energii získáváme hlavně spalováním fosilních paliv a štěpením atomů. Tyto zdroje však nejsou nevyčerpatelné a proto je nutné hledat další alternativy získávání energie a zdokonalovat technologie dosavadní. Navíc zpracování těchto zdrojů s sebou nutně nese neblahý vliv na životní prostředí. Postupy, jakými je energie z paliv získávána nám jsou již dlouhou dobu známi. Zpravidla to bývá tak, že získanou tepelnou energii předáme určitému médiu a to ji dále předá skrz turbínu generátoru elektrické energie. Tímto postupem nám však vznikne obrovské množství odpadního tepla, které dále nedokážeme využít. K tomu by nám v budoucnu mohla dopomoci právě termoakustická zařízení. Touto problematikou se zabývá mnoho výzkumných ústavů po celém světě. V nynější době se zkoumá, jak by tyto stroje mohly vypadat a pracuje se na zvyšování jejich účinnosti. Jejich místo nemusí být jenom v elektrárnách, ale všude tam, kde máme k dispozici přebytečné teplo. Další možnost aplikace je uvnitř nových generací solárních panelů. Nezvratnou výhodou těchto zařízení je skutečnost, že ke svému chodu nepoužívají pohyblivých mechanismů, jako jsou vačky, písty, ložiska atd., čímž rovněž odpadá nutnost mazání pomocí olejů. Jako pracovní médium se zde dá použít vzduch, nebo v případě sofistikovanějších zařízení helium či xenon, což jsou plyny bez neblahých vlivů na životní prostředí. Další předností je jednoduchost těchto strojů a nízké nároky na přesnost výroby. Je možno uplatnit několik možností využití tohoto zařízení, jako je přeměna tepla na práci a naopak přeměna práce pro přečerpávání tepla, podobně jako v tepelných čerpadlech. Výzkum probíhá všemi těmito směry s tím, že se v jednotlivých laboratořích věnují výhradně vlastní myšlence. Např. v *University of Utah* se pokoušejí teplo přeměnit na zvukovou energii a tu dále přeměňují pomocí piezoelektrického jevu přímo v elektřinu. Tato práce je zaměřena na navržení zkušebního termoakustického stroje pro vědeckou činnost naší fakulty. V první části se věnuji teorii funkce zařízení, jeho možným konfiguracím a podobám. V druhé části je pozornost zaměřena na vlastní návrh a základní výpočty. Třetí část jsem věnoval některým získaným poznatkům z měření.

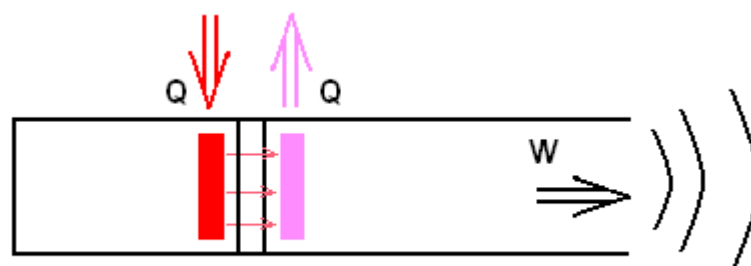
Historie:

S termoakustickým jevem se v dřívějších dobách příležitostně setkávali skláři, jejichž ohřáté sklářské píšťaly emitovaly čisté tóny. Vzájemným působením tepla a zvuku se akustika zabývá od roku 1816, kdy francouzský fyzik a matematik Pierre Laplace opravil Newtonovi zákony týkající se rychlosti zvuku. Newton v nich neuvažoval malé změny teploty, ke kterým ve skutečnosti dochází a považoval děj za izotermický. Laplace tuto skutečnost však neopomněl a dospěl k názoru, že komprese a expanze přítomná při vlnění s sebou nutně nese malé adiabatické teplotní změny. Dospěl tedy k výsledku, který byl o 18 % vyšší, než výsledek Newtonův. O více jak sto let později byl odhalen opačný efekt, kdy se pomocí zdroje vlnění podařilo vytvořit teplotní rozdíl. Tohoto principu se dá využít v TTC [1].

1. Teorie termoakustického jevu

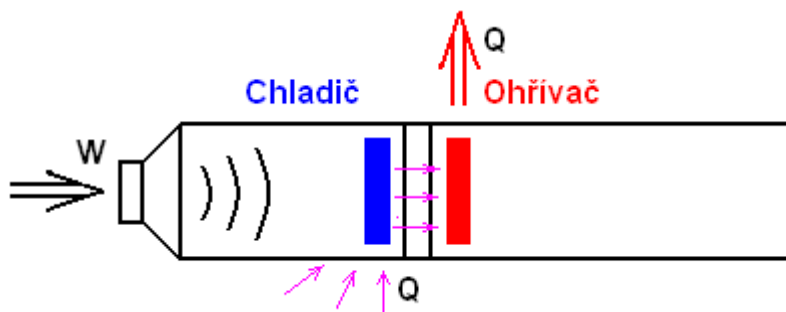
1.1. Podoby termoakustických zařízení:

Termoakustické zařízení (dále TZ) si můžeme v nejjednodušší formě představit jako trubku (rezonátor), která je rozdělena porézním materiálem (keramikou) s nízkou tepelnou vodivostí. Na straně, kde chceme teplo přivádět je rezonátor uzavřen. Jakmile přivedeme teplo, uvnitř keramiky vznikne teplotní spád (gradient), což má za následek vznik stojatých vln. Pakli-že chceme udržet zařízení v trvalém chodu, musíme zamezit prohřátí keramiky na studeném konci. Obvykle teplo odvedeme do okolního prostředí samovolným prouděním vzduchu, v izolovaných soustavách však musíme použít přídavného chlazení. Tímto způsobem tedy přeměňujeme tepelnou energii na mechanickou práci v podobě akustický vln (obr. 1). Tomuto seskupení říkáme termoakustický motor (dále TM) [1].



Obr. 1 – Schéma TM

Druhou možností je umístit zdroj vlnění (reproduktor) z jedné strany uzavřeného rezonátoru a keramiku vložíme stejně, jako v předešlém případě. Toto seskupení může pracovat buď jako chladič na jedné straně, nebo jako ohřívač na straně druhé. Po uvedení reproduktoru do chodu se uvnitř kanálků keramiky začnou šířit stojaté vlny, které přesouvají teplo z jedné strany na druhou. Zde tedy pomocí mechanické práce zkrátka přečerpáváme teplo z jednoho konce na druhý tak, jak to známe z běžných tepelných čerpadel (obr. 2). Na jedné straně tedy máme teplotu nižší, než je teplota okolí a naopak. Toto seskupení můžeme dále nazývat termoakustickým tepelným čerpadlem (dále TTČ) [1].

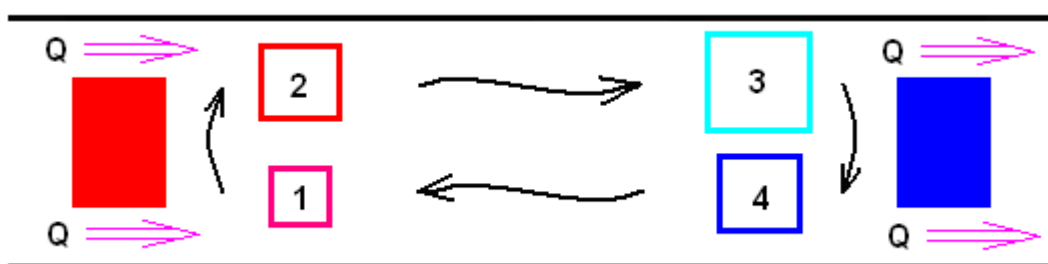


Obr. 2 – Schéma TTČ

1.2. Princip termoakustického motoru:

Představme si trubku, z jedné strany uzavřenou a rozdělenou porézní keramikou tak, jak je to popsáno v (1.1.). Jakmile přivedeme teplo, rozeběhne se cyklus následovně: Uvnitř vlny, pohybující se k místu největší komprese (1), se adiabaticky zvyšuje teplota částice plynu (tzn. teplo se při tom nesdílí se svým okolím). Teplota plynu je (i při největším stlačení) nižší, než teplota stěny výměníku a teplo tedy přechází na teplém konci izobaricky do plynného média (2). Následně se balík plynu přesouvá

doprovázen postupnou adiabatickou expanzí. Jakmile se element dostane na studený konec, jeho teplota se sníží na hodnotu, která je vyšší než teplota stěny a tak se zde v dalším kroku teplo předá studenému konci (3). To má za následek další shlázení elementu a tím i snížení jeho objemu (4). Tento chladný plyn je poté působením zvukové vlny opět přemístěn k teplému konci a cyklus se opakuje (obr. 3). Takovýto proces je situován uvnitř každého kanálku keramiky. Balíčky plynu jsou zde znázorněny nad sebou pro lepší srozumitelnost, ale ve skutečnosti kmitají pouze sem a tam [1].

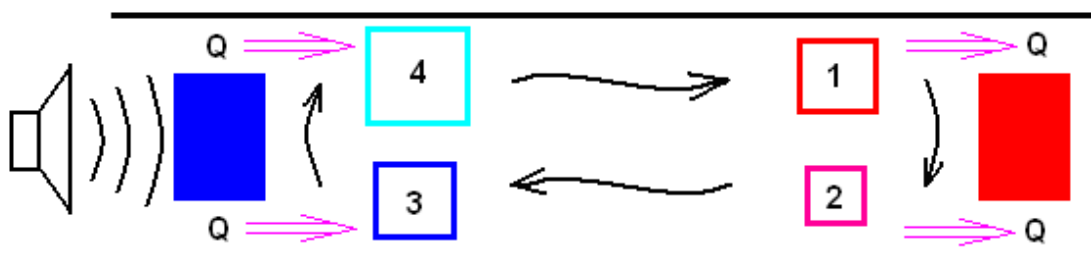


Obr. 3 – Popis pracovního cyklu TM

1.3. Princip termoakustického tepelného čerpadla:

Představme si, že máme TTČ v tlakové a teplotní rovnováze. Když nám uvnitř projde zvuková vlna, dochází při ní k velmi malým a zároveň velmi rychlým změnám tlaku. Při každé vlně tedy dochází ke kompresi, což má za následek zvýšení teploty a následně k expanzi, čímž se plyn opět ochladí. Tyto drobné tlakové niance nám za normálních podmínek dávají rozdíl teplot pouze v desetitisících teplotního stupně. Jestliže chceme dosáhnout většího rozdílu teplot, který je pro praktická využití nutností, musíme zařízení důkladně odizolovat a celý systém náležitě upravit. Celý proces přenesení tepla z jedné strany na druhou si můžeme představit tak, že vlna vycházející od zdroje hluku vyvolá adiabatickou kompresi, při níž se zvýší teplota částice plynu na úroveň vyšší, než je teplota stěny (1). Následně se zde teplo izobaricky předá stěně výměníku a objem plynu se sníží (2). Během druhé poloviny cyklu vlna putuje ke studenému konci a postupně expanduje. Když vlna dorazí, teplota plynu je na nižší úrovni, nežli je teplota stěny (3) a tak se zde teplo izobaricky odebere stěně výměníku (4). V poslední fázi se tedy izobaricky zvýší objem elementu díky zvýšení jeho teploty

(3 - 4). Celý proces se dále opakuje a teplo se přesouvá z jedné strany na druhou (obr. 4) [1].

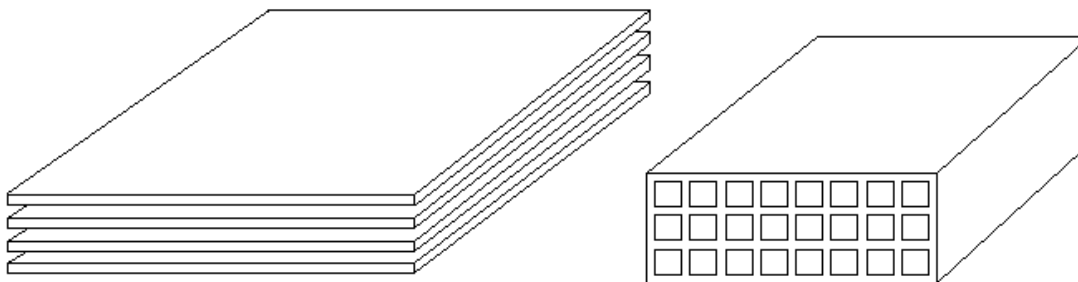


Obr. 4 – Princip pracovního cyklu TTČ

Tento proces probíhá uvnitř každého kanálku keramiky a teplý a studený konec zde představují výměníky tepla po stranách stacku.

1.4. Konstrukce keramiky (stacku):

Jak je známo, termoakustický jev mohli pozorovat už staří skláři, když jejich rozžhavené píšťaly emitovaly čisté tóny. My k dosažení stejného jevu používáme porézní keramiku, která jakoby se skládala z velkého množství malých píšťal (kanálů) a rezonátoru v podobě dlouhé zcela uzavřené roury. Tyto kanály mohou být kruhového i hranatého tvaru, někdy se používá i rovnoběžných desek malé tloušťky s roztečí rovnou asi dvojnásobku penetrační hloubky (viz .dále) (obr. 5). V některé literatuře se tvrdí, že rozteč má být rovna čtyřnásobku penetrační hloubky [1].



Obr. 5 – Možné podoby stacku

Takovémuto materiálu se v anglické literatuře říká „Stack“ (hromada), neboť je složen z vrstvených desek (hromady desek). Pro naše účely by měl mít ideální stack nulovou tepelnou vodivost v podélném směru a zároveň nekonečnou tepelnou kapacitu. Takovým požadavkům dobře odpovídá právě keramika. Uvnitř již zmíněných kanálů se šíří zvukové vlny velmi vysokých amplitud s tlakem odpovídajícím asi 5% atmosférického tlaku.

Vzdálenost, přes kterou dochází k přestupu tepla z plynu na pevnou stěnu a naopak se nazývá **tepelná penetrační hloubka** $\delta_K [m]$ [1]. Její velikost závisí na frekvenci daného vlnění a na použitém médiu. Pakliže použijeme jako médium vzduch a frekvence spadá do oblasti námi slyšených vln, pak naše tloušťka odpovídá asi jedné desetíně milimetru.

$$\delta_K = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot k}{\rho \cdot c_p \cdot \omega} \right)} \quad (1)$$

k – tepelná vodivost vzduchu $0,0262 [W / (m \cdot K)]$

ρ - hustota použitého média $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

c_p - měrná tepelná kapacita použitého média $\left[\frac{J}{(kg \cdot K)} \right]$

ω - úhlová frekvence $[rad / s]$

Podobný rozměr, který charakterizuje tloušťku vazké mezní vrstvy pro oscilující proudění a pevnou stěnu, se nazývá **viskózní penetrační hloubka** $\delta_v [m]$.

$$\delta_v = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \nu}{\omega} \right)} \quad (2)$$

ν - kinematická viskozita $[m^2 / s]$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

η - dynamická viskozita $[Pa \cdot s]$

Velikost těchto vrstev se vztahuje na bezrozměrné **Prandtlovo číslo** σ , v našich končinách známé spíše jako Pr .

$$\sigma = \left(\frac{\delta_V}{\delta_K} \right)^2 \quad \text{nebo také} \quad \text{Pr} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \nu}{k} \quad (4)$$

Pro většinu plynů bývá $\sigma \cong 2/3$, tudíž jsou tloušťky vrstev téměř stejné, naproti tomu pro směsi lehkých plynů (např. helium), nebo těžké plyny (xenon), může být Prandtlovo číslo až 0,2. Tento údaj je pro nás důležitým ukazatelem při výběru pracovního média.

Kanály naší keramiky naplněné pracovním plynem mají charakteristický rozměr, který nazýváme **Hydraulický poloměr** r_h , což je objem jednoho kanálu vydělený plochou obepínající tento kanál.

$$r_h = \frac{V_{Poru}}{A_{Dotyku}} \quad (5)$$

Pro kanál s čtvercovým průřezem o straně **a** a délce **l** tedy platí:

$$r_h = \frac{a \cdot a \cdot l}{4 \cdot a \cdot l} \Rightarrow r_h = \frac{a}{4} \quad (6)$$

Pro kanál s kruhovým průřezem o poloměru **r** a délce **l** platí:

$$r_h = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \Rightarrow r_h = \frac{r}{2} \quad (7)$$

Dalším bezrozměrným ukazatelem, který nám napomáhá určit vhodnost našeho stacku je **Lautrecovo číslo** N_L .

$$N_L = \frac{r_h}{\delta_K} \quad (8)$$

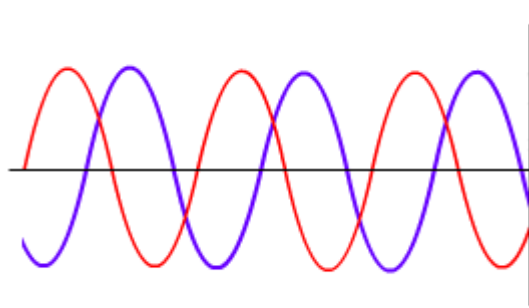
Pakliže je $N_L \geq 1$, pak naší keramice říkáme **stack**, když je $N_L \leq 1$, říkáme jí **regenerátor**. Toto číslo dokáže určit, zdali nejsou kanálky (rozteče rovin) našeho stacku příliš úzké. Kdyby tomu tak bylo, nemohlo by dojít k termoakustickému jevu.

1.5. Popis stojatého vlnění:

Šíření zvukových vln v prostoru popisuje celá řada fyzikálních principů. Vlny se v prostoru odrážejí, lámou a ohýbají, sčítají se s jinými vlnami, podléhají tlumení atd. Dopadne-li zvuková vlna na překážku, dojde k jejímu odrazu. Na vlastnostech překážky závisí průběh odražené vlny. Pakli-že bude překážka pevná, odražená vlna vychází s opačnou fází a s výchylkou stejné velikosti, jako má vlna dopadající (obr. 6) [2].

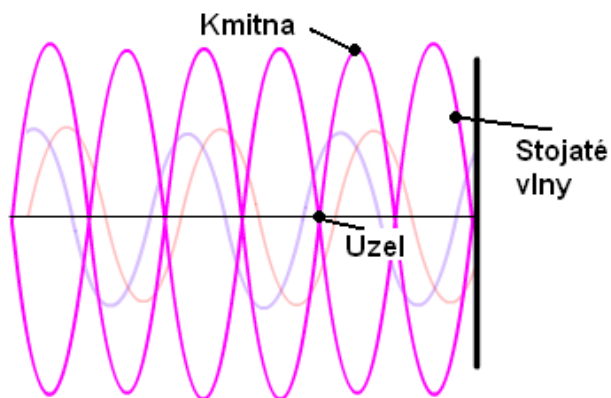


Obr. 6 – Odraz na pevné překážce



Obr. 8 – Odraz na poddajné překážce

Tyto vlny se navzájem skládají (interferují) a vzniká stojaté vlnění (obr. 7), které se vyznačuje tím, že některé jeho body jsou stále v klidu (uzly) a jiné v maximálním pohybu (kmitny).



Obr. 7 – Stojaté vlny, kmitny a uzly

K odrazu dojde i když je překážka poddajná. V tom případě odražená vlna vychází se stejnou fází, jako má vlna dopadající a výchylka je stejné velikosti (obr. 8). Jako poddajnou překážku si můžeme představit třeba i neuzavřený konec rezonátoru. Tyto vlny se poté skládají jako v předešlém případě. Z hlediska akustického tlaku jsou pohybové uzly tlakovými kmitnami a obráceně – pohybové kmitny jsou tlakovými uzly. Vzájemné posunutí průběhu akustického tlaku a rychlosti je rovno $\frac{1}{4}$ vlnové délky λ .

Pojem „akustický tlak“ se dá definovat jako rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě a hodnotou trvalého statického tlaku. Jedná se tedy o střídavou proměnnou hodnotu, která se v čase neustále mění z kladných hodnot do záporných a naopak a přičítá se k statickému tlaku. Okolo nás se běžně vyskytuje hodnota akustického tlaku asi 100 Pa, což je tisícina běžného atmosférického tlaku. Z hlediska akustiky je důležitým údajem **hladina akustického tlaku L**. Ta určuje, o kolik je okamžitá hodnota vyšší, než vztažná hodnota. Je udána v decibelech (**dB**).

$$L = 20 \log \left(\frac{p_1}{p_m} \right) \quad (9)$$

p_1 - okamžitá výchylka tlaku [Pa]

p_m - referenční hodnota akustického tlaku (má hodnotu $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)

Decibel je jednotka logaritmická, platí tedy, že o 6 dB vyšší hodnota akustického tlaku odpovídá dvojnásobné hlasitosti. Pro nás asi nejzákladnějším údajem je frekvence, kterou dané zařízení vyvozuje. Závisí na délce rezonátoru, na rychlosti zvuku v použitém médiu a na zakončení rezonátoru. Pro rezonátor zcela uzavřený platí tento vztah (náš případ):

$$f = \frac{c}{4l} \quad (10)$$

Pro zcela uzavřený rezonátor platí:

$$f = \frac{c}{2l} \quad (11)$$

Rychlost zvuku je dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}} = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (12)$$

κ - Poissonova konstanta (pro nás 1,4)

R - molová plynová konstanta $8,31447 \text{ [J / (mol} \cdot \text{K)]}$

T - termodynamická teplota [K]

M - molekulová hmotnost [kg / mol]

Jak ze zmíněných výpočtů vyplývá, na chod zařízení má zásadní vliv použité médium,

neboť rychlost zvuku např. v heliu je při $t = 0^\circ\text{C}$ $c_{\text{He}} = 970\text{m/s}$, oproti rychlosti ve vzduchu $c = 331\text{m/s}$.

1.6. Termodynamické zákonitosti termoakustického jevu:

K pochopení způsobu, jakým jsou vibrace podporovány je nutné vyjádřit změny teploty a tlaku pomocí adiabatického procesu (bez sdílení tepla s okolím). Adiabatická stavová rovnice pro ideální plyn je $p \cdot V^\kappa = \text{const.}$, kde polytropický koeficient pro takový adiabatický děj je $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ [1].

c_p - měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku $\left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right]$

c_v - měrná tepelná kapacita za konstantního objemu $\left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right]$

Pro jeden mol plynu platí $\frac{p}{\rho} = r \cdot T$, kde p je tlak $[\text{Pa}]$, r je plynová konstanta $[\text{J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})]$ a ρ je hustota $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Přidáním do jiného vztahu se dá odvodit:

$$\frac{1}{T_m} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial \ln T}{\partial p} \right)_s \cong \frac{T_1}{T_m} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{p_1}{p_m} \quad (13)$$

Teplota oscilující částice je T_1 a průměrná teplota plynu je T_m . Při běžné řeči je hladina akustického tlaku asi 80 dB, což odpovídá $p_1 = 0,28\text{Pa}$. Proto je amplituda teplotní oscilace $T_1 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{K}$, pakliže platí $T_m = 293\text{K}$, $\kappa = 1,4$.

Při dostatečně nízké frekvenci jsme schopní spočítat tlak a rychlost částice plynu v daném bodě dle následujících vztahů:

$$p(x, t) = p_m + p_1 \cos(kx_s) \cdot e^{j\omega t} \quad (14)$$

$$u(x, t) = u_1 \cdot \sin(kx_s) \cdot e^{j\omega t} = \frac{P_1}{\rho_m \cdot c} \cdot \sin(kx_s) \cdot e^{j\omega t} \quad (15)$$

p_m - průměrná hodnota tlaku [Pa]

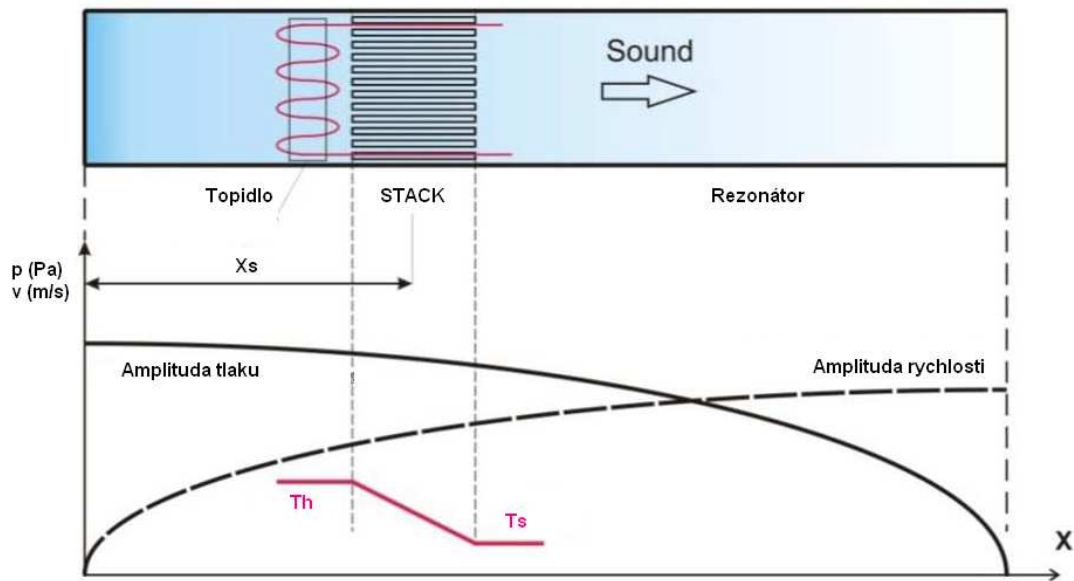
ρ_m - průměrná hustota [kg / m³]

x_s - podélná vzdálenost od uzavřené stěny [m]

p_1 - amplituda oscilujícího tlaku [Pa]

u_1 - amplituda oscilující rychlosti [m / s]

k je **akustické vlnové číslo** a spočte se dle vztahu $k = \frac{\omega}{a} = \frac{2\pi}{\lambda}$. Neboť vlnová délka v polozavřeném rezonátoru je rovna čtyřnásobku délky rezonátoru L , v našem případě je $k = \frac{\pi}{2L}$. Ve vzdálenosti $x = 0$ je uzel rychlosti, tzn. $u(x = 0) = 0$ a tlak je zde maximální. Průběh tlaku a rychlosti po délce rezonátoru je znázorněn na (obr. 9).



Obr. 9 – Průběh amplitudy tlaku a rychlosti

Zařízení může pracovat dvěma způsoby, buď jako TM, nebo jako TTČ. Poměr Γ nám říká, jaký z těchto dvou způsobů platí pro náš případ. Pakliže je $\Gamma > 1$, jde o TM a naopak [6]. Platí tedy vztah:

$$\Gamma = \frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}} = \frac{\frac{\Delta T_m}{l_s}}{\nabla T_{crit}} \quad (16)$$

$$\nabla T_{crit} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\kappa \cdot p_m}{c_p \cdot \rho_m} \cdot \frac{1}{l} = \frac{\pi}{2} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_m \cdot \frac{1}{l} \quad (17)$$

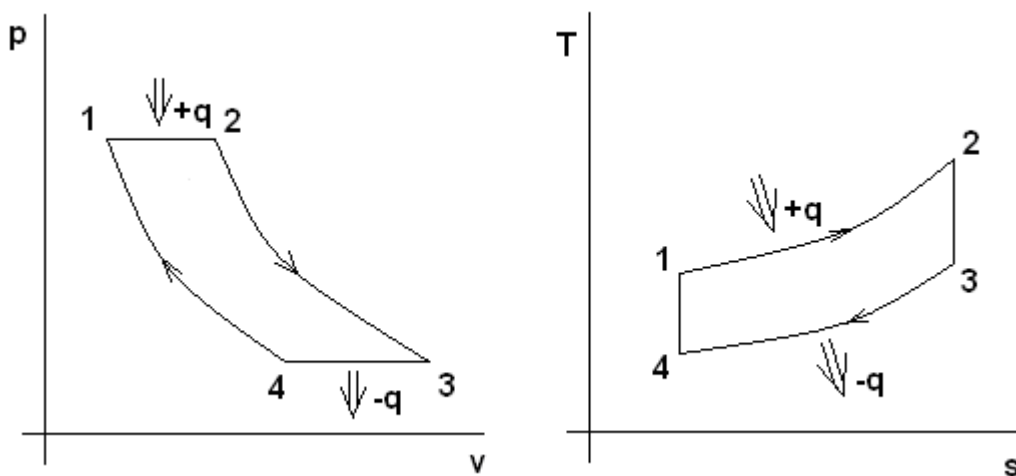
ΔT_m - Rozdíl teplot mezi horní a spodní rovinou stacku [K]

l_s - Výška stacku [m]

V některé literatuře se uvádí pro **kritický teplotní gradient** ∇T_{crit} tento vztah, v kterém je patrná závislost vzdálenosti stacku od uzavřeného konce rezonátoru:

$$\nabla T_{crit} = (\kappa - 1)k \cdot T_m \cdot \cot g(kx_s) \quad (18)$$

Jak už bylo řečeno, chod termoakustického zařízení si můžeme představit ve čtyřech cyklech, stejně jako to známe například u spalovacího motoru, nebo dalších tepelných oběhů. Z toho plyne, že by jsme měli být teoreticky schopni spočítat celkovou účinnost tohoto zařízení, nicméně je obtížné změřit přibližný výkon akustických oscilací a ještě obtížnější změřit teplo odvedené do okolí. V ideálním případě se cyklus skládá ze dvou izobarických a dvou adiabatických dějů. Nazýváme jej Braytonův cyklus [6] (obr. 10).



Obr.10 – Průběh cyklu

Číslování jednotlivých bodů na obr. 10 koresponduje s obr. 3, tudíž i popis průběhu v kapitole „Princip TM“ platí pro tento obr.

Účinnost tohoto oběhu se spočítá dle vztahu:

$$\eta = \frac{q_{dod} - q_{odv}}{q_{dod}}$$

q_{dod} - přivedené teplo [J / kg]

q_{odv} - odvedené teplo [J / kg]

Z uvedené rovnice vyplývá, že ke zvýšení účinnosti zařízení je vhodné přivádět médium s nízkou teplotou T , tj. s teplotou o málo vyšší, nežli je teplota okolí. Především tím zbytečným tepelným ztrátám, změní se poměry v T -s diagramu přivedeného tepla q_{dod} a odvedeného tepla q_{odv} a navíc budeme schopni využít odpadní tepelné energie, která má mnohdy nízkou hodnotu T . U jednoduchých experimentálních zařízení podobných našemu se s účinností pohybujeme okolo jednotek procent, ale při využití všech poznatků z odvětví termoakustiky jsme schopni docílit účinnosti obdobné jako u spalovacích motorů[3].

2. Návrh zařízení:

2.1 Účel zařízení:

Neboť se naše katedra chce pro vlastní zkušenost seznámit s principy těchto ne



Obr. 11 - malé provedení T

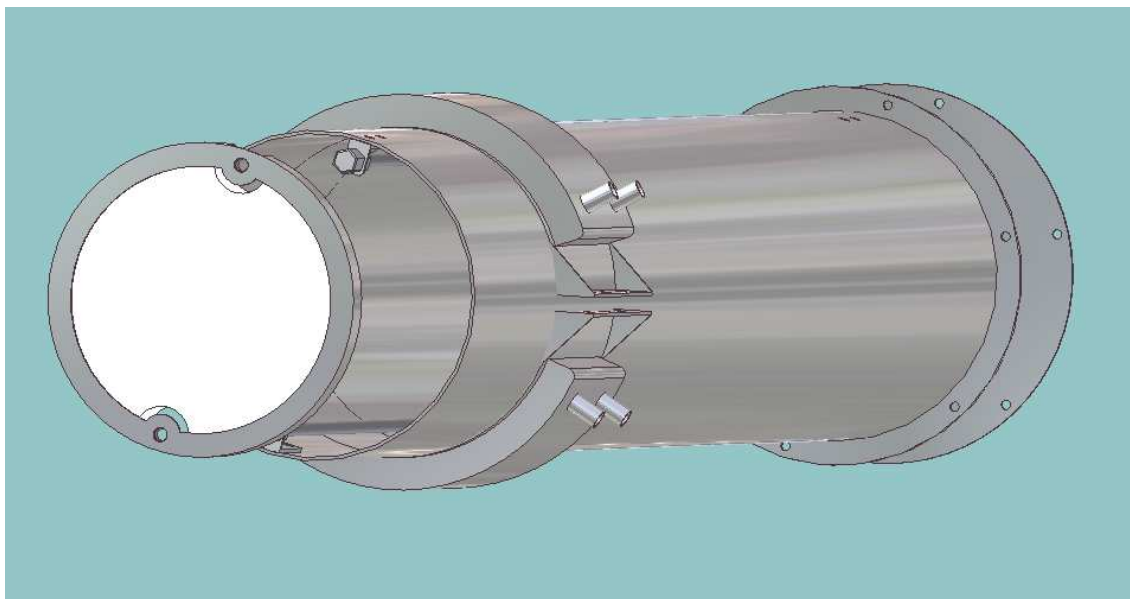
dosti probádaných technologií a třeba i přijít s vlastní myšlenkou, bylo rozhodnuto o sestavení experimentálního termoakustického stroje. Na základě zkušeností získaných z malých TM, skládajících se z hranatého skleněného rezonátoru, vhodného stacku, topidla a potřebného elektrického vybavení (obr. 11), byly vytvořeny požadované parametry na nový vhodnější stroj. Jeho účelem je potvrzení poznatků získaných naší i cizí prací, ověření výpočtů a má nám dopomoci k získání představy, jakým způsobem vlastně zařízení pracuje.

2.2. Požadované parametry a vlastnosti:

Po konzultaci s vedoucím Doc. Ing. Tomášem Vítem, Ph.D. bylo rozhodnuto, že zařízení má být vyrobeno z nerezového materiálu o průměru rezonátoru 200 mm a s délkou přibližně 1500 mm. Důležitou vlastností stroje má být schopnost, měnit vzdálenost stacku jak od otevřeného konce rezonátoru, tak od uzavřeného konce, popřípadě měnit celkovou jeho délku. Pro uzavřenou stranu rezonátoru se má zvolit vhodné topné těleso a zajistit, aby bylo co nejméně vzdáleno od stěny stacku a dále, aby bylo bezpečně elektricky odizolováno. Na opačnou stranu máme umístit chladič, též co možná nejbližší stacku. Neboť je kov dobrý tepelný vodič, musíme zabránit vedení tepla skrz nerezovou stěnu rezonátoru ke studenému konci. Chladič i ohřívač musí být navržen s ohledem na to, aby nebránili akustickým vlnám v průchodu po délce rezonátoru, tj. nesmíme rezonátor „ucpat“. Vzhledem k tomu, že se bude často měnit stack a pracovat s připojením termočlánků, je důležitý snadný přístup do těchto míst a též by mělo být zařízení jednoduché na rozmontování a na celkovou práci s ním. Pro připojení termočlánků musíme zajistit vhodný výstup.

2.3. Možnosti provedení:

První možností, jak zajistit podélnou seřiditelnost stacku, je umístit jej do speciální klece, která je schopna posouvání po délce rezonátoru. Tato klec je po stranách připevněna ke dvěma závitovým tyčím. Tyče jsou na obou koncích rezonátoru připevněny tak, aby jim bylo umožněno otáčení a zároveň aby se při něm axiálně neposouvali. Stack se tedy posouvá zvenčí pomocí těchto závitových tyčí. Aby zařízení bylo schopno konat akustický jev, topidlo i chladič musejí být též připevněny ke kleci držící stack. K zajištění chlazení stěny rezonátoru slouží speciální objímka, umožňující průtok chladicí kapaliny (obr. 12).

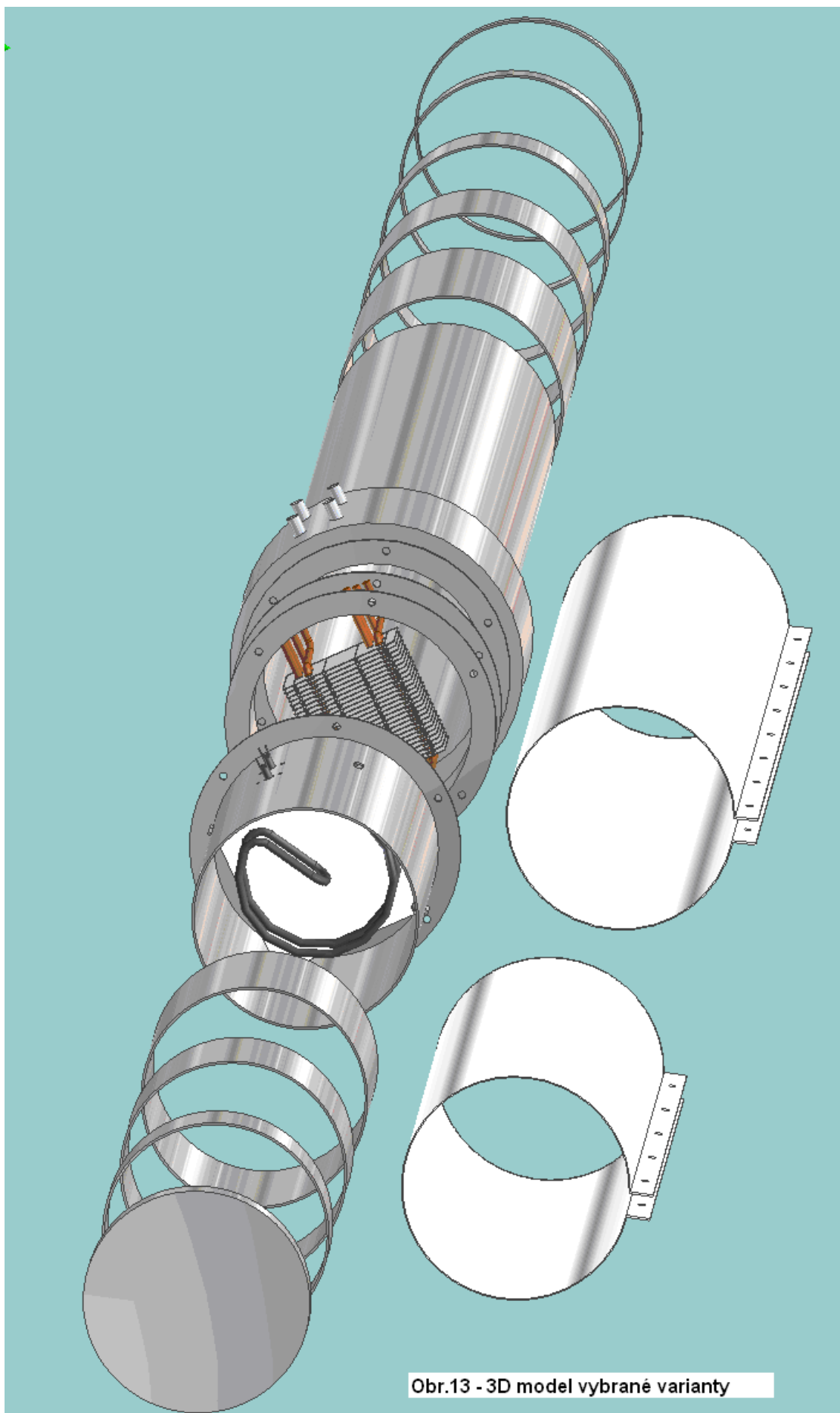


Obr. 12 – První možnost provedení TM

Druhé řešení, pomocí kterého chceme docílit obdobných vlastností je o poznání jednodušší. Stack je pevně připevněn ke spodní části stroje a bezprostředně pod ním je umístěna topná spirála. Ta je přišroubována ke stěně rezonátoru a elektrické připojení je snadno dosažitelné zvenčí této stěny. Na to je posazen horní díl, který má ve spodní části vodní chladič, jenž odvádí teplo ze stěny rezonátoru a přispívá k lepšímu chlazení stacku. Celé zařízení se dá ladit pomocí vymežovacích kroužků, které můžeme libovolně přidávat a ubírat podle našich potřeb. Je možné i měnit celkovou délku zařízení. Vymežovací kroužky jsou zajištěny pomocí dlouhých převlečených objímek. V případě potřeby se mezi horní a spodní díl dá vložit přídavný chladič, který odvádí teplo přímo ze stěny stacku. (obr. 13 + detaily)

2.4. Výběr varianty:

Výhodou prvního provedení je pozvolné nastavení hloubky zasunutí stacku a dále schopnost, činit tak, aniž by bylo zařízení rozmontováno. Naproti tomu není snadné zajistit přívod el. energie tak, aby se mohl kabel napájení posouvat spolu se stackem a el. izolace by jen těžko odolala vysokým teplotám topného tělesa. To samé platí i pro přívod chladicí kapaliny. Hadičky se v tomto případě musí přivést horním otvorem, což je nevhodné řešení. Z toho důvodu jsme se rozhodli pro druhou možnost, u které jsme nenarazili na větší konstrukční a technologické problémy. Vybraná varianta je znázorněna na obr. 13 a 14 ve 3D a v podobě řezu.



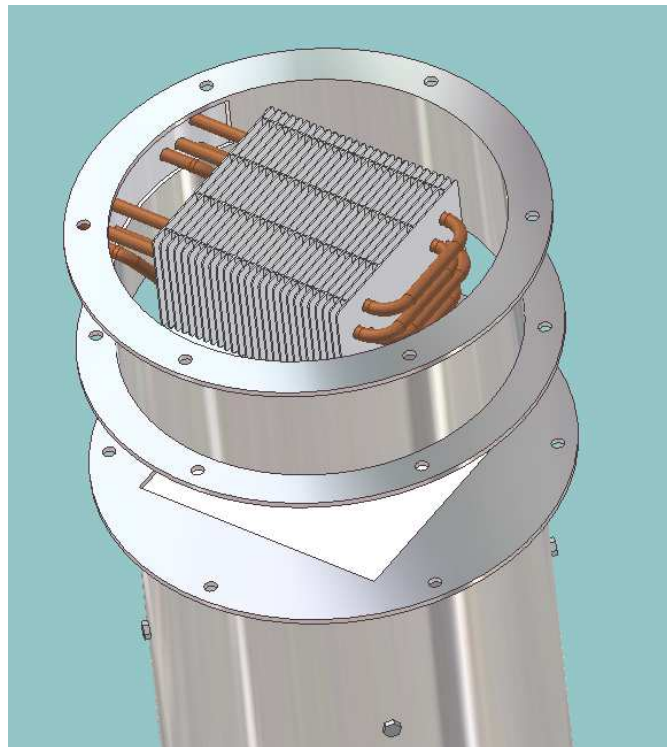
Obr.13 - 3D model vybrané varianty



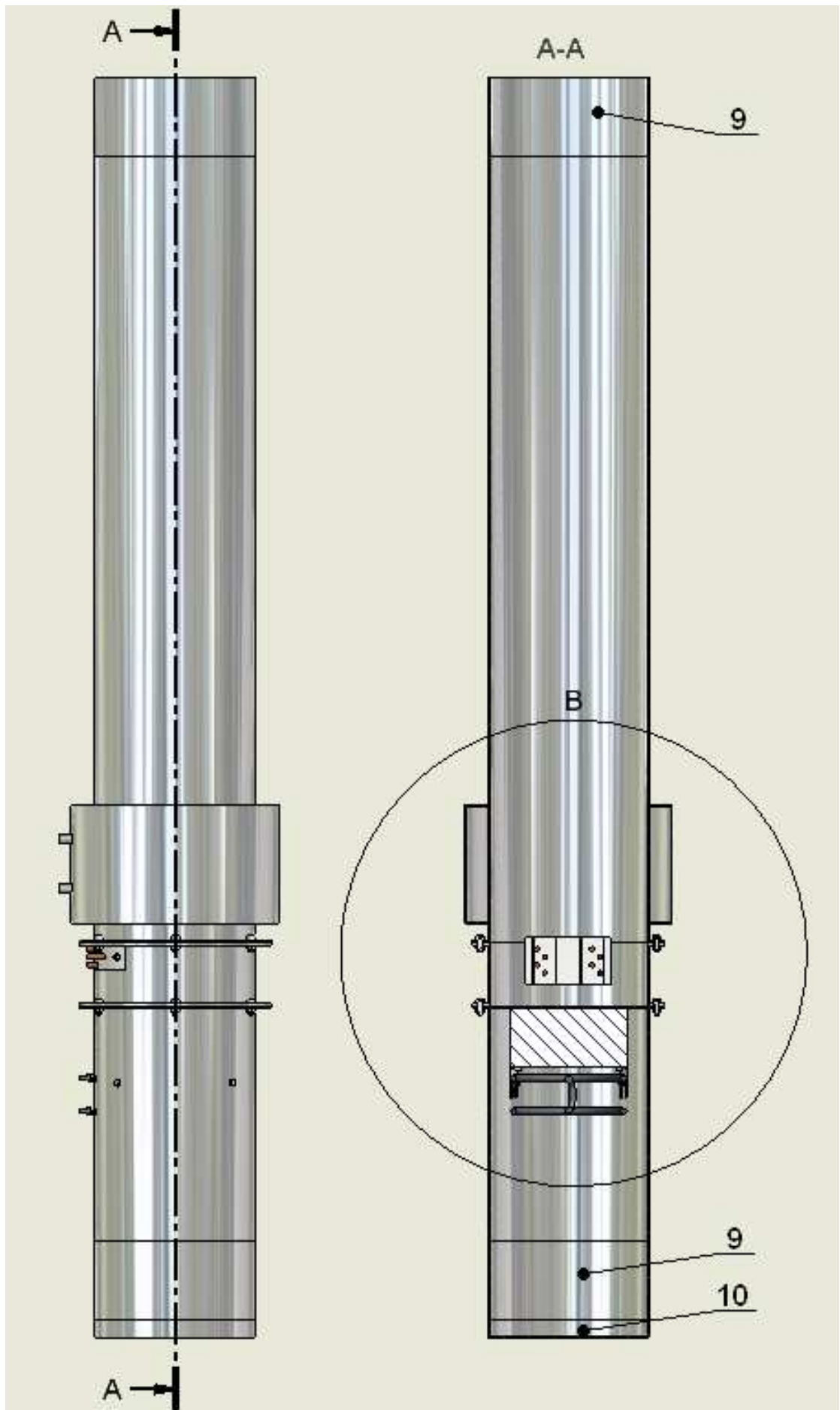
Detail I

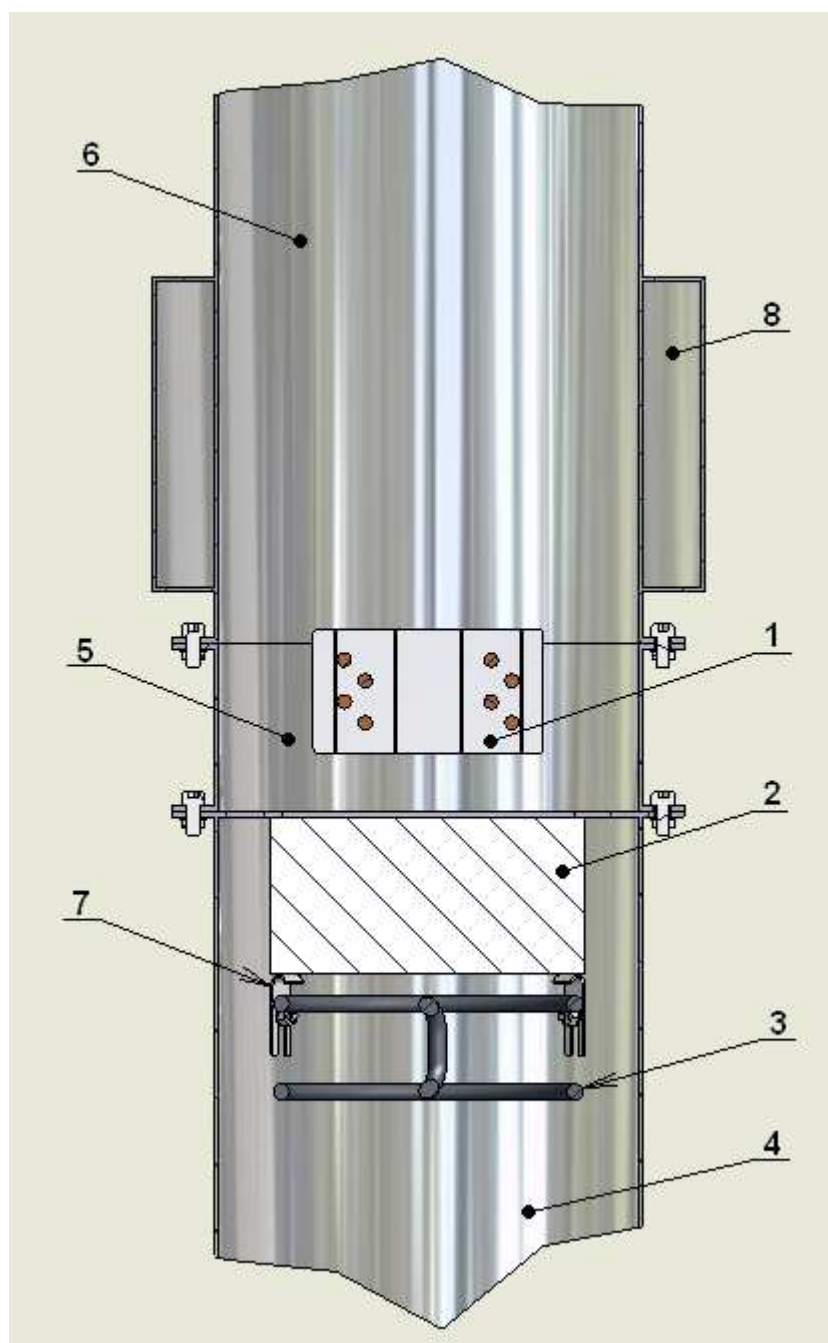


Detail II



Detail III





2.5. Popis zařízení:

1) Chladič stacku – Je složený z vrstvených hliníkových lisovaných plechů. Chladicí kapalina protéká uvnitř měděných trubiček prostrčených skrz tyto plechy. Tento chladič slouží k chlazení povrchu studeného konce stacku (detail III). Pro chod zařízení není jeho přítomnost nezbytná, zlepšuje ale odvod tepla.

2) Stack – Naším stackem je keramická destička, která se hojně využívá uvnitř katalyzátorů spalovacích motorů. V našem případě není povrch pokovený vrstvou platiny. Je složena z velkého množství čtvercových kanálků. Šířka stěny $s = 0,35\text{mm}$, vnitřní délka hrany kanálku $a = 1,5\text{mm}$ a výška keramiky $h = 50\text{mm}$.

3) Topné těleso – Zde je použita odporová topná spirála s výkonem 2000 W pro střídavé napětí 230 V. Odpor činí $25\ \Omega$.

4) Spodní díl rezonátoru – Je složen z příruby, o kterou se zespod opírá stack a z kratší části rezonátoru. Po obvodu jsou připevněny čtyři přítlačné plíšky, jenž přitlačují stack proti přírubě. Topné těleso je přišroubované ke stěně trubky. Zvenčí jsou přivařeny tři dlouhé nohy (pro lepší přehlednost nejsou znázorněny na obrázcích) umožňující snadnou obsluhu zařízení.

5) Úchyt chladiče – Ke spodní a horní části rezonátoru je připevněn pomocí přírub. Jeho účelem je zajistit chladič stacku co nejbližší povrchu keramiky.

6) Horní díl rezonátoru – Skládá se z dlouhé trubky, příruby a chladiče stěny.

7) Přítlačné plíšky – Jsou sevřeny ke stěně rezonátoru pomocí šroubů a přitlačují stack k přírubě spodního dílu rezonátoru. Mají v sobě hluboký zářez, díky čemuž jsou schopny držet stacky rozdílných výšek.

8) Chladič stěny – Je součástí horního dílu rezonátoru. Odvádí teplo, jenž projde kovovou stěnou od topného tělesa. Pro lepší proudění uvnitř dutiny chladiče je kapalina přivedena pomocí dvou vstupů a odvedena též dvěma výstupy. Stejně jako chladič stacku není chladič stěny pro chod nezbytný. Bez jejich přítomnosti se však může stack prohřát, čímž se jev ukončí.

9) Vymezovací kroužky – Slouží k nastavení vzdálenosti stacku jak od uzavřeného, tak od otevřeného konce rezonátoru. Mají prstencový tvar a jsou vyrobeny ze stejného materiálu, jako rezonátor.

10) Ucpávka – Uzavírá rezonátor na straně topného tělesa

11) Stahovací objímky – Slouží k zajištění souososti a k uchycení libovolného množství vymezovacích kroužků a ucpávky. Objímka je vyrobena z tenkého ocelového plechu a svírá se pomocí dlouhých šroubů. Obě jsou znázorněny na (obr. 3).

3. Výpočty:

3.1. Všeobecné výpočty

Vzhledem k tomu, že produktem našeho zařízení je práce v podobě akustických oscilací, bude pro nás jistě zajímavé znát některé vlastnosti tohoto vlnění. Nejzákladnějším údajem je vyvozovaná frekvence. Ta je závislá na rychlosti šíření zvuku v daném prostředí a zvuk je dále závislý na teplotě tohoto prostředí. Vzhledem k tomu, že teplota plynu uvnitř rezonátoru je po celé jeho délce různá, nelze frekvenci spočítat s naprostou přesností, ale výsledek se skutečnosti dosti blíží. Berme tedy v úvahu že $T_m = 323K$, $R = 8314,47J/(Kmol \cdot K)$, $\kappa = 1,4$, $M = 28,96g/mol$, $L = 1,47m$

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T_m}{M}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8314,47 \cdot 323}{28,96}} \Rightarrow \underline{\underline{c = 360,3m/s}}$$

- pro frekvenci pak platí:

$$f = \frac{c}{4l} = \frac{360,3}{4 \cdot 1,47} \Rightarrow \underline{\underline{f = 61,3Hz}}$$

Užitečným ukazatelem je pro nás poměr Γ . S jeho pomocí si můžeme vytvořit zdánlivý pohled na účinnost zařízení. Čím větší je jeho hodnota, tím méně účinné naše zařízení je. Platí: $x_s = 0,35m$, $\Delta T_m = 140K$

$$k = \frac{\pi}{2l} = \frac{\pi}{2 \cdot 1,47} \Rightarrow k = \underline{\underline{1,0686}}$$

- pro kritický teplotní gradient pak platí:

$$\begin{aligned} (\nabla T_m)_{crit} &= (\kappa - 1)k \cdot T_m \cdot \cot g(k \cdot x_s) \\ &= (1,4 - 1) \cdot 1,0686 \cdot 323 \cdot \cot g(1,0686 \cdot 0,35) \\ &\Rightarrow \underline{\underline{(\nabla T_m)_{crit} = 352 K}} \end{aligned}$$

$$\Gamma = \frac{\frac{\Delta T_m}{l_s}}{\nabla T_{crit}} = \frac{\frac{140}{0,05}}{352} \Rightarrow \underline{\underline{\Gamma = 7,95}}$$

Naším cílem je, aby se poměr Γ blížil co možná nejvíce hodnotě jedné.

Chceme-li zjistit Prandtlovo číslo, musíme spočítat tloušťku tepelné a viskozní penetrační hloubky. Pro 323 K známe: $k = 0,02775 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, $\rho = 1,07875 \text{ kg} / \text{m}^3$, $c_p = 1006,5 \text{ J} / (\text{Kg} \cdot \text{K})$, $\eta = 19,356 \cdot 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 61,3 \Rightarrow \underline{\underline{\omega = 385 \text{ rad} / \text{s}}}$$

- pro tepelnou penetrační hloubku platí:

$$\begin{aligned} \delta_K &= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot k}{\rho \cdot c_p \cdot \omega} \right)} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 0,02775}{1,07875 \cdot 1006,5 \cdot 385} \right)} \\ &\Rightarrow \underline{\underline{\delta_K = 3,644 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,3644 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

- pro viskozni penetrační hloubku platí:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{19,356 \cdot 10^{-6}}{1,07875} \Rightarrow \underline{\underline{\nu = 1,7943 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}}}$$

$$\delta_v = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \nu}{\omega}\right)} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 1,7943 \cdot 10^{-5}}{385}\right)}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\delta_v = 3,053 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,3053 \text{ mm}}}$$

- Prandtlovo číslo je potom:

$$\text{Pr} = \left(\frac{\delta_v}{\delta_k}\right)^2 = \left(\frac{0,3053}{0,3644}\right)^2 \Rightarrow \underline{\underline{\text{Pr} = 0,7019}}$$

Tento výsledek tedy odpovídá teorii.

3.2. Výpočet topného výkonu:

Vzhledem k tomu, že se v teorii tyto výpočty neuvádí, museli jsme k dosažení výsledku provést měření. Naším úkolem tedy bylo zjistit, jaký je minimální příkon elektrické energie potřebný pro chod zařízení. Pro zjištění těchto údajů jsme použily malý TM s čtvercovým průřezem o vnitřních hranách 5x5 cm. Výkon potřebný pro chod tohoto motoru byl 50 W. Dle vztahu $P_p = \frac{P_M}{S_M}$ je potřebný výkon na jednotku plochy $P_p = 2 \text{ W/cm}^2$. Vycházeli jsme z předpokladu, že pro chod velkého TM je zapotřebí stejného plošného výkonu, jako u malého TM.

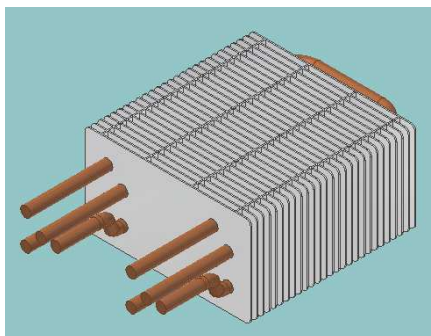
Pro velký TM tedy platí:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} \Rightarrow \underline{\underline{S_v = 314,16 \text{ cm}^2}}$$

$$P_v = P_p \cdot S_v = 2 \cdot 314,16 \Rightarrow \underline{\underline{P_v = 628,3 \text{ W}}}$$

Minimální potřebný výkon pro chod velkého TM by se tedy měl pohybovat okolo hodnoty $P_v = 628,3 \text{ W}$.

3.3. Výpočet chladicího výkonu:



Obr. 15 – Použitý chladič

Vzhledem k tomu, že se mi nepodařilo získat podklady pro výpočet chladiče takového typu, kterého jsme užili (obr. 15), byl jsem nucen použít podkladů k výpočtu podobného chladiče a to typu s žebrovanou trubkou. U tohoto provedení chladiče se ke zvětšení teplosměnné plochy užívá kruhových žebor, zatímco u našeho jsou žebra obdélníková a společná pro několik trubek. Proto jsem zvolil ke každé trubce ekvivalentní kruhové žebro, které nahradí společné obdélníkové. Výpočet proveden dle [4].

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot t_{ls}$$

\dot{Q} - Tepelný výkon chladiče [W]

A - Teplosměnná plocha [m²]

t_{ls} - Logaritmická střední hodnota rozdílu teplot médií [°C]

k - Součinitel prostupu tepla [W/(m² · K)]

$$\frac{1}{k} = A_c \cdot \left[\frac{1}{\alpha_z \cdot [A_c - (1 - \Omega) \cdot A_z]} + \frac{1}{A_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right) \right]$$

A_c - Celková plocha žebrovaného povrchu trubky [m²]

A_i - Plocha vnitřní hladké plochy trubky [m²]

A_z - Plocha povrchu žebor [m²]

α_i - Souč. přestupu tepla na vnitřní straně trubky [W/(m² · K)]

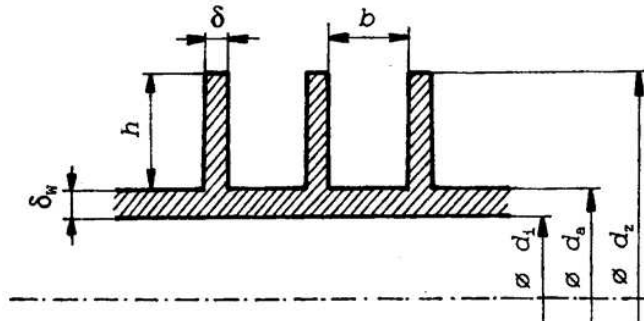
α_z - Souč. přestupu tepla na žebrované straně [W/(m² · K)]

δ_w - Tloušťka stěny trubky [m]

λ_w - Součinitel tepelné vodivosti mat. žeber $[W/(m \cdot K)]$

Ω - Účinnost žeber

Zadané hodnoty:



$$\varnothing d_i = 0,004m$$

$$\varnothing d_a = 0,006m$$

$$\varnothing d_z = 0,022m$$

$$h = 0,008m$$

$$b = 0,00305m$$

$$\delta = 0,0005m$$

$$\delta_w = 0,001m$$

$$n = 29 \text{ - počet řad žeber}$$

$$l = 8 \text{ - počet trubek pronikajících žebry}$$

$$L = 100mm \text{ - délka trubky s žebry}$$

Plocha povrchu žeber A_z :

$$A_z = \frac{\pi \cdot (d_z^2 - d_a^2)}{4} \cdot 2 \cdot l \cdot n = \frac{\pi \cdot (0,022^2 - 0,006^2)}{4} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 29$$
$$\Rightarrow A_z = 0,16326m^2$$

Celková plocha žebrovaného povrchu trubky A_c :

$$A_c = l \cdot \pi \cdot (n-1) \cdot b \cdot d_a + A_z =$$
$$8 \cdot \pi \cdot (29-1) \cdot 0,00305 \cdot 0,006 + 0,16326$$
$$\Rightarrow A_c = 0,17614m^2$$

Plocha vnitřní hladké plochy trubky A_i :

$$A_i = l \cdot \pi \cdot d_i \cdot L = 8 \cdot \pi \cdot 0,004 \cdot 0,1$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{A_i = 0,01005 m^2}}$$

Součinitel přestupu tepla na žebrované straně α_z :

$T_t = 373 K$ - Teplota okolního média

$T_s = 313 K$ - Teplota stěny trubky

$$T_U = \frac{T_t + T_s}{2} = \frac{373 + 313}{2} \Rightarrow \underline{\underline{T_U = 343 K = 70^\circ C}}$$

- Pro teplotu $70^\circ C$ platí: $\nu = 19,966 \cdot 10^{-6} m^2 / s$ - kinematická viskozita vzduchu

$\lambda = 0,0292 W / (m \cdot K)$ - tepelná vodivost vzduchu

$\rho = 1,01615 kg / m^3$ - hustota vzduchu

$c_p = 1008 J / (kg \cdot K)$ - měrná tepelná kapacita vzduchu

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} = \frac{0,0292}{1008 \cdot 1,01615} \Rightarrow \underline{\underline{a = 2,85 \cdot 10^{-5}}}$$

$$P_r = \frac{\nu}{a} = \frac{19,966 \cdot 10^{-6}}{2,85 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow \underline{\underline{P_r = 0,7}}$$

$w = 0,3 m / s$ - rychlost oscilujících částí plynu

$d_u = 0,006 m / s$ - určující rozměr (průměr trubky)

$$R_e = \frac{w \cdot d_u}{\nu} = \frac{0,3 \cdot 0,006}{19,966 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow \underline{\underline{R_e = 90}}$$

$$N_U = C \cdot R_e^n \cdot \varepsilon_\psi = 0,695 \cdot 90^{0,46} \cdot 1 \Rightarrow \underline{\underline{N_U = 5,51}}$$

$$N_U = \frac{\alpha_o \cdot d_U}{\lambda} \Rightarrow \alpha_o = \frac{N_U \cdot \lambda}{d_U} = \frac{5,51 \cdot 0,0292}{0,006}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\alpha_o = 26,82 W / (m^2 \cdot K)}}$$

- Dle grafu z [4] je poměr:

$$\frac{\alpha_z}{\alpha_o} = 0,675 \Rightarrow \alpha_z = 0,675 \cdot \alpha_o = 0,675 \cdot 26,82 \Rightarrow \underline{\underline{\alpha_z = 18,1W/(m^2 K)}}$$

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky α_i :

$T_t = 298K$ - Teplota okolního média

$T_s = 308K$ - Teplota stěny trubky

$$T_U = \frac{T_t + T_s}{2} = \frac{298 + 308}{2} \Rightarrow \underline{\underline{T_U = 303K = 30^\circ C}}$$

- Pro teplotu $30^\circ C$ platí: $\nu = 0,805 \cdot 10^{-6} m^2/s$ - kinematická viskozita vody

$\lambda = 0,616W/(m \cdot K)$ - tepelná vodivost vody

$\rho = 995,6kg/m^3$ - hustota vody

$c = 4174,2J/(Kg \cdot K)$ - měrná tepelná kapacita vody

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = \frac{0,616}{1,482 \cdot 995,6} \Rightarrow \underline{\underline{a = 1,482 \cdot 10^{-7}}}$$

$$P_r = \frac{\nu}{a} = \frac{0,805 \cdot 10^{-6}}{1,482 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow \underline{\underline{P_r = 5,43}}$$

$w = 1,65m/s$ - rychlost chladicí kapaliny

$d_u = 0,004m$ - určující rozměr (průměr trubky)

$$R_e = \frac{w \cdot d_u}{\nu} = \frac{1,65 \cdot 0,004}{0,805 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow \text{Turbulentní proudění}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{R_e = 8200}}$$

$$N_U = 0,015 \cdot P_r^{0,42} \cdot R_e^{0,83} = 0,015 \cdot 5,43^{0,42} \cdot 8200^{0,83} \Rightarrow \underline{\underline{N_U = 54,1}}$$

$$N_U = \frac{\alpha_i \cdot d_U}{\lambda} \Rightarrow \alpha_i = \frac{N_U \cdot \lambda}{d_U} = \frac{54,1 \cdot 0,616}{0,004} \Rightarrow \underline{\underline{\alpha_i = 8331,4W/(m^2 \cdot K)}}$$

Součinitel prostupu tepla k :

$\lambda_w = 312W/(m \cdot K)$ - dle tabulek

- dle grafu z [4]:

$$\Omega = 1$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} &= A_c \cdot \left[\frac{1}{\alpha_z \cdot [A_c - (1 - \Omega) \cdot A_z]} + \frac{1}{A_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right) \right] = \\ 0,17614 \cdot &\left[\frac{1}{18,1 \cdot [0,17614 - (1 - 0,2) \cdot 0,16326]} + \frac{1}{0,01005} \left(\frac{1}{8331,4} + \frac{0,001}{312} \right) \right] \\ &= 0,2159 \Rightarrow k = \frac{1}{0,2159} = k = 4,63 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

Logaritmická střední hodnota rozdílů teplot médií t_{1s} :

$t_{A1} = 25^\circ\text{C}$ - Vstupní teplota chladicí kapaliny

$t_{A2} = 30^\circ\text{C}$ - Výstupní teplota chladicí kapaliny

$t_B = 100^\circ\text{C}$ - Teplota na povrchu chladiče

$$t_{1s} = \frac{t_{A2} - t_{A1}}{\ln \frac{t_B - t_{A1}}{t_B - t_{A2}}} = \frac{30 - 25}{\ln \frac{100 - 25}{100 - 30}} \Rightarrow t_{1s} = 72,47^\circ\text{C}$$

Celková teplosměnná plocha:

$$A = A_c + 4 \cdot m \cdot \pi \cdot d_a = 0,17614 + 4 \cdot 0,16 \cdot \pi \cdot 0,006 \Rightarrow A = 0,1882 \text{ m}^2$$

Celkový výkon chladiče:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot t_{1s} = 4,63 \cdot 0,1882 \cdot 72,47 \Rightarrow \dot{Q} = 63 \text{ W}$$

4. Získané poznatky:

Než jsme začali promýšlet, jak bude experimentální zařízení vypadat, bylo nutné nejprve zprovoznit malý zkušební stroj a získat na něm základní poznatky z oboru termoakustiky. Trvalo dost času, než se podařilo zařízení uvést do chodu. První stroj, který se nám podařilo zprovoznit, se skládal ze skleněného rezonátoru s obdélníkovým průřezem a z keramiky o vysoké pórovitosti. Jako topidlo byl použit odporový drát namotaný na kousek keramiky a umístěný bezprostředně pod stackem. Jakmile se nám podařilo TM rozhoukat, zjišťovali jsme, jaké podmínky jsou pro chod příznivé a naopak.

Hloubka zasunutí stacku:

Prvním důležitým poznatkem byla skutečnost, že na chod stroje má velký vliv hloubka zasunutí stacku. Zařízení je schopné pracovat, když se keramika nachází zhruba v jedné čtvrtině až v jedné polovině rezonátoru (měřeno od zaslepeného konce) s tím, že ideální pozice je zhruba v jedné třetině jeho délky. Z toho důvodu musí být u nového stroje vzdálenost seřiditelná pro případ, že by umístění keramiky nebylo optimální. V našem případě je toho docíleno pomocí vymezovacích kroužků.

Vhodná podoba stacku:

Dále jsme zjišťovali, jaké jsou ideální proporce stacku. Firmou Rauschert nám bylo zasláno několik druhů keramiky o různé pórovitosti a rozměrech. Bohužel keramiku s nejvyšším množstvím kanálků jsme obdrželi pouze v malém provedení a tak jsme ji mohli využít jenom v malém skleněném rezonátoru. Zjistili jsme, že keramika s nejvyšší pórovitostí je pro chod zařízení ideální. Hrana kanálků by se teoreticky mohla snižovat až na rozměr dvojnásobku tepelné penetrační hloubky. Kdybychom rozměr kanálků snižovali dále, chod zařízení by nebyl možný. Naproti tomu jakmile jsme použili stack s velkými kanálky, zařízení se nerozeběhlo. Dále jsme zjistili, že je vhodné použít stack s menší délkou kanálků, neboť při použití nejdelšího možného stacku bylo zapotřebí dosažení vyššího výkonu topidla. Zkracováním keramiky jsme docílili určité délky, při které se potřebný výkon již výrazně neměnil.

Netěsnosti:

Dále jsme se zaměřili na důsledky netěsností, jak mezi keramikou a rezonátorem, tak netěsnostmi samotného rezonátoru. Zpočátku se nám nedařilo uvést velký TM do chodu, právě kvůli těmto netěsnostem. Při použití skleněného TM není s netěsnostmi problém, neboť je stroj slepený silikonem podobně jako akvárium. Stack se zde posouvá zvenčí pomocí měděných drátků do požadované výšky. Naproti tomu ladění velkého TM se provádí pomocí vymezovacích kroužků, mezi nimiž se vždy díky malým nepřesnostem vytvoří štěrbina. Tato štěrbina je pro chod zařízení nepřípustná! To jsme se dozvěděli, když se nám podařilo uvést do chodu obyčejnou měděnou trubku. Z jedné strany jsme ji uzavřeli tak, že jsme ji postavili svisle na rovnou skleněnou destičku. Po uvedení zařízení do chodu, jsme rezonátor malinko vychýlili ze svislé polohy tak, že nám mezi trubkou a sklem vznikla miniaturní štěrbina, což mělo za následek okamžité ukončení termoakustického jevu. Proto bylo nutné všechny netěsnosti utěsnit pomocí silikonu a speciální alobalové lepicí pásky. Na stykovou plochu horního a spodního dílu rezonátoru jsme nanесли vrstvu topenářského tmelu, který mimo jiné zabraňuje vedení tepla. Po těchto opatřeních se nám konečně podařilo velký TM rozeběhnout. Zkoumáním netěsností mezi samotným stackem a stěnou rezonátoru jsme došli k závěru, že tyto štěrby chodu nevadí, a dokonce mohou být poměrně velké.

Uchycení stacku:

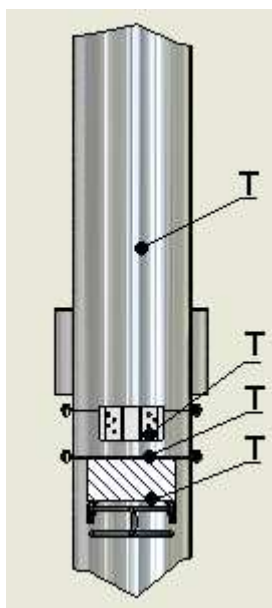
Nebyli jsme si jistí, zda funkci zařízení nenaruší pevné uchycení stacku. Z počátku byla keramika pouze volně zavěšena na měděných drátkách, což ji umožňovalo určitou volnost v pohybu. Tato domněnka byla později vyvrácena, když jsme stack pevně zaklínili a zabránili mu v pohybu. Na funkci zařízení to nemělo vliv.

Zajímavosti:

Při pokusu, kdy byla jako rezonátor použita měděná trubka jsme došli k zajímavému poznatku. Jako zaslepení jsme zde použili důkladně napnutou alobalovou pásku tak, že tato sestava svou konstrukcí připomínala dlouhý bubínek a páska zde plnila úlohu membrány. Jakmile bylo přivedeno teplo, zařízení se rozeběhlo podobně jako obyčejně s tím rozdílem, že zvukové oscilace byly silnější díky rezonancím membrány. Po přitlačení prstu na tuto membránu se zvuk měnil podle jejího napnutí. V normálním případě je rychlost vlny na pevné stěně nulová a tlak je naopak maximální. V tomto případě nastává situace, kdy tlak a rychlost nemají hodnotu ani

nulovou, ani maximální. Dále jsme zjistili, že zmíněná membrána napomáhá rozběhu zařízení. Během našich pokusů se nám podařilo rozezvučit mnoho dalších zařízení v nejrůznějších podobách. Byla mezi nimi například i měděná trubka stočená do tvaru kolene.

5. Měření:

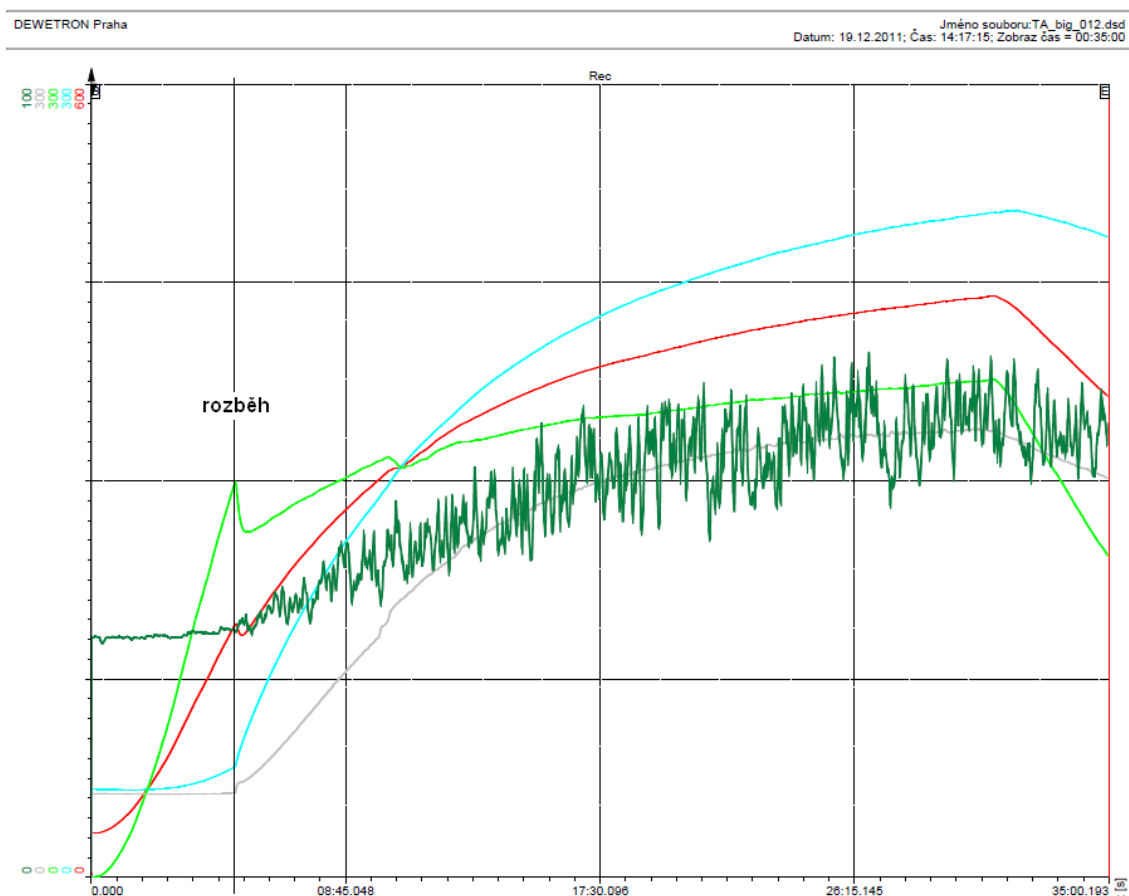


Záměrem našich měření bylo zjistit, jaký je nutný minimální elektrický příkon pro trvalý chod zařízení, rozdíl teplot na horní a spodní straně stacku v momentu rozběhu termoakustického jevu a dále získat celkový průběh teplot v různých místech rezonátoru závislých na čase. Pro tento účel jsme umístili termočlánky (v obrázku označeny T) dle (obr. 16). Hlukoměrem jsme zjišťovali frekvenci vlnění. Zde uvedený graf a popis patří pro jedno z mnoha provedených měření.

Obr. 16 – Rozmístění
termočlánků

Výsledek měření je zobrazen na (graf 1). Po přivedení tepla se začala zvyšovat teplota na spodní straně stacku, zatímco na opačné straně se zvyšovala jen nepatrně. Rozběhnutí jevu nastalo po pěti minutách zahřívání. Průběh teploty na teplém konci mírně zakolísá tak, že se její hodnota sníží a po chvilce začne opět stoupat. V ten samý moment začne strmě stoupat teplota na studeném konci, neboť se teplo oscilacemi přenáší skrz stack. Rozdíl teplot (studený/teplý konec) se při rozběhu u většiny pokusů pohybuje okolo hodnoty 140°C. Teplota ve vzdálenosti 500 mm od stacku je díky oscilacím výrazně proměnná a drží se v průměru okolo 50°C. Hlukoměrem naměřená frekvence vlnění odpovídá teoreticky spočítané hodnotě. Zvukové oscilace byly

zaznamenány pomocí frekvenční pásmové analýzy. Přesný výkon potřebný pro trvalý chod zařízení se nám zatím změřit nepodařilo, ale blížíme se k hodnotě okolo 700W.



Graf 1 – Průběh teplot uvnitř TM

	rozsah
Teplota ve výšce 500 mm nad stackem.....	100°C
Teplota povrchu chladiče.....	300°C
Rozdíl teplot studený/teplý konec.....	300°C
Teplota stacku na studeném konci.....	300°C
Teplota stacku na teplém konci.....	600°C

Potřebná technika a programy:

- Inventor 7 – 3D
- Autodesk AutoCAD 2006 – 2D
- DEWE – 5000 – pro měření pomocí termočlánků
- ruční hlukoměr typ – 2250
- termočlánky typ K – chromel+alumel

Závěr:

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout TZ dle daných požadavků a dále k němu zvolit vhodný topný a chladicí člen. Tento úkol se podařilo splnit, neboť jsme zařízení po překonání obvyklých počátečních obtíží zprovoznili. Hlavními problémy byly netěsnosti v některých místech rezonátoru. S těmito nedostatky jsme se však záhy vypořádali.

Zajímavou částí této práce se stal návrh chladiče. Je obtížné vytvořit takové jeho konstrukční řešení, které by nebránilo akustickým oscilacím a zároveň by odvedlo co nejvíce tepla z požadovaného místa. Literatura se o těchto technických řešeních nezmiňuje a tak jsme se s touto otázkou museli vypořádat po svém. V tomto směru je do budoucna jistě přínosné hledat vhodné konstrukce chladičů. V našem případě je použit chladič počítačových procesorů upraven pro naše potřeby. Ačkoli jeho výkon není vysoký, nesmíme zapomenout na to, že odvádí teplo přímo z potřebného místa.

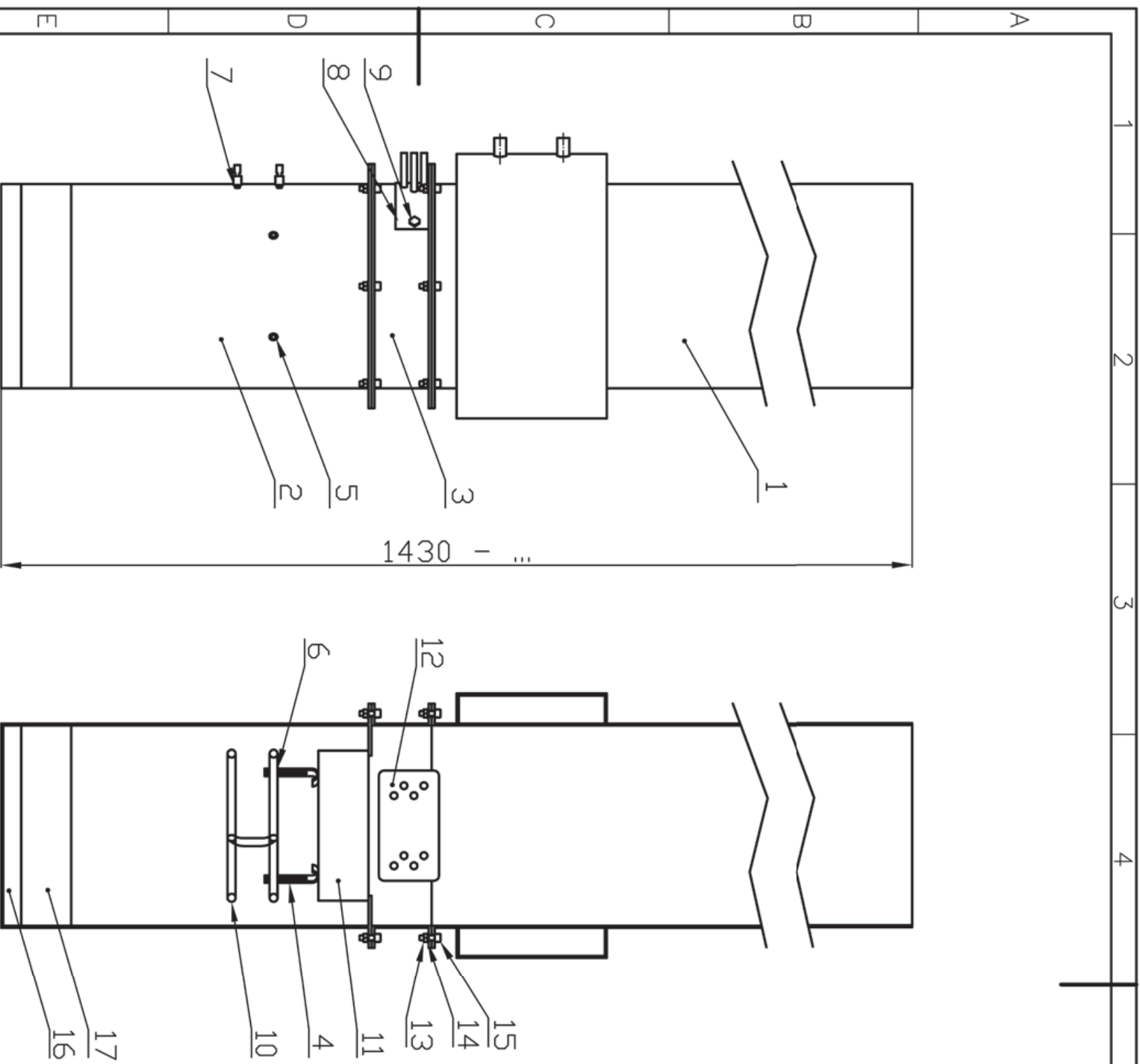
Na stroji jsme již provedli několik měření, při nichž jsou hlavním sledovaným údajem teploty v různých místech rezonátoru. Nyní sledujeme chování stroje při rozběhu a snažíme se zajistit takové podmínky, aby byl chod zařízení nepřetržitý a zároveň aby pracoval s co nejnižším příkonem.

Literatura:

- [1] Garrett S. L.: Thermoacoustic Engines and Refrigerators, The 4th International Meeting of Advances in Thermofluids, Melaka, Malaysia, 1-15
- [2] Petr Bernat: Akustika, vznik a šíření zvuku
http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [3] Josef Pazdera: University of Utah
<http://www.osel.cz/tisk.php?clanek=2706>
- [4] Lenka Schreiberová, Oldřich Holeček: Prostup tepla povrchem s žebry, VŠChT – Praha, <http://www.vscht.cz/uchi/ped/labchi/T2.pdf>
- [5] Jiří Bureš: Fyzikální vlastnosti plynů
<http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [6] Novotný P., Vít T.: Standing-Wave Thermoacoustic Engines, Experimental Fluid Mechanics 2011, Jičín
- [7] Swift G.W.: Thermoacoustic Engines, J. Acoust. Soc. Am. 84(4), 1988
- [8] Swift G. W.: Analysis and Performance of a Large Thermoacoustic Engine, Acoust. Soc. Am. 92(3), 1992

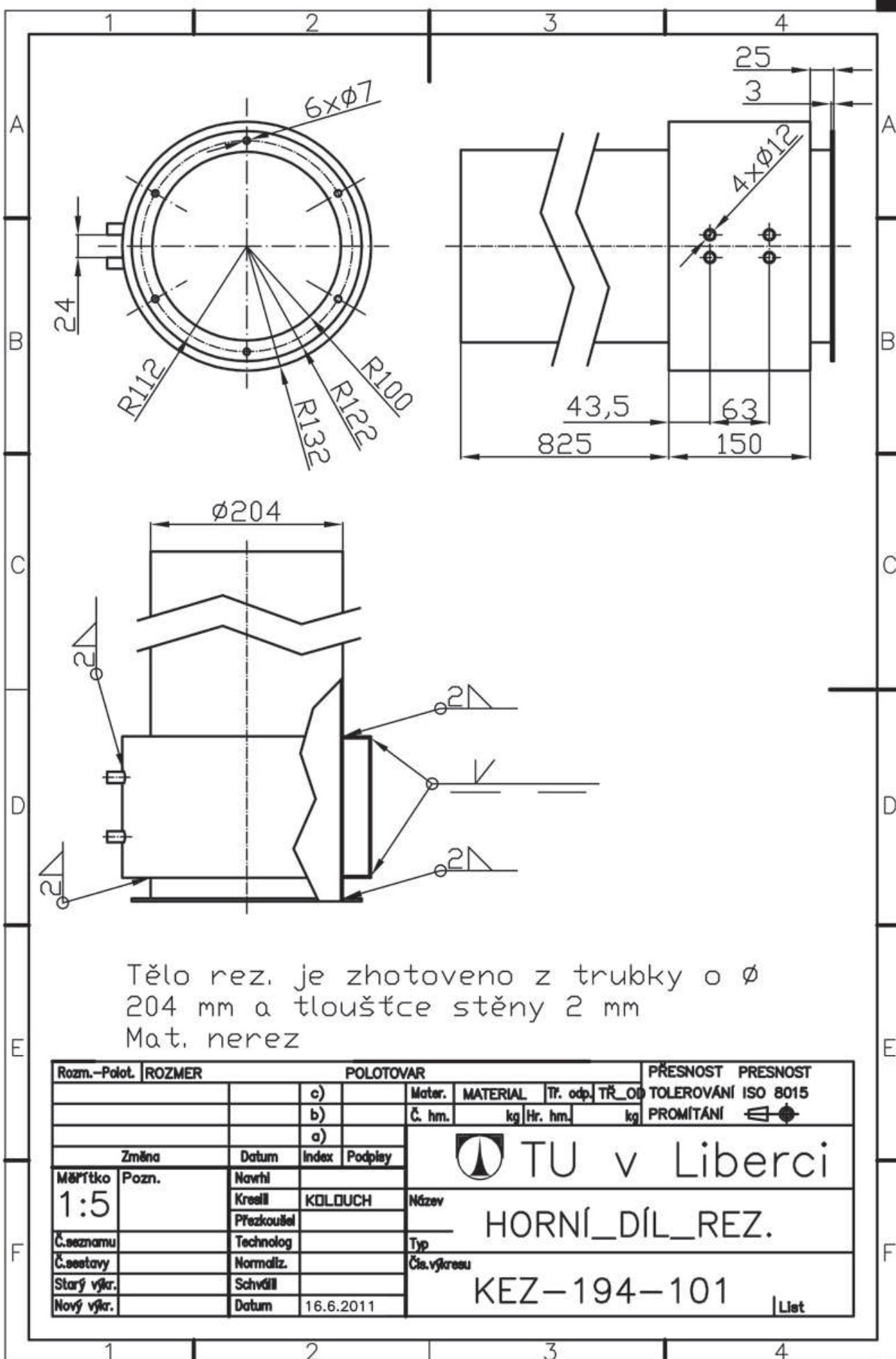
Seznam příloh

Sestava.....	KEZ – 194 – 100
Horní díl rezonátoru.....	KEZ – 194 – 101
Spodní díl rezonátoru.....	KEZ – 194 – 102
Úchyt chladiče.....	KEZ – 194 – 103
Přítlačný plíšek.....	KEZ – 194 – 104
Krytka.....	KEZ – 194 – 105
Stack.....	KEZ – 194 – 106
Chladič.....	KEZ – 194 – 107
Víčko.....	KEZ – 194 – 108
Vymezovací kroužky.....	KEZ – 194 – 109
Objímka 800.....	KEZ – 194 – 110
Objímka 500.....	KEZ – 194 - 111

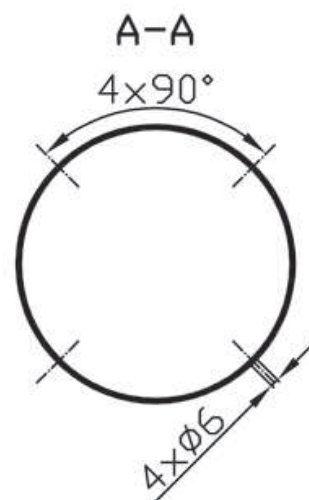
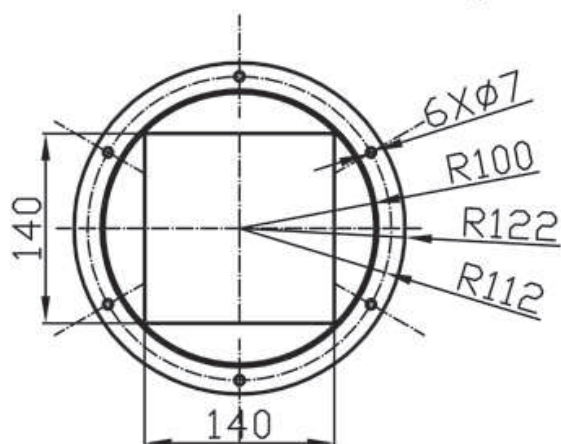


Netěsnosti je nutno zatěsnit pomocí např. topenářského tmele. Vymezovací kroužky jsou připevněny pomocí objímek znázorněných na výkresech KEZ-194-110 a KEZ-194-111, které zde pro přehlednost nejsou znázorněny.

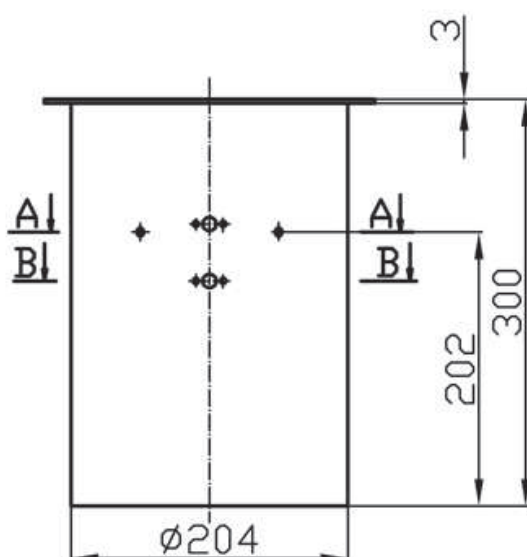
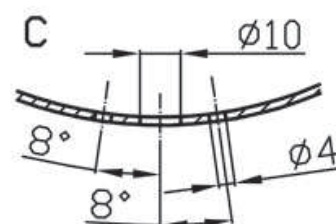
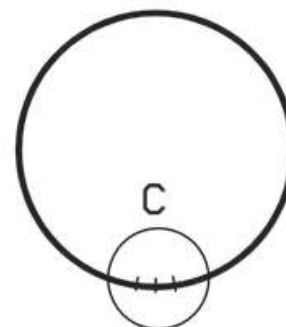
17	VYMEZOVACÍ_KROUŽKY	KEZ-194-109	NEREZ	/	/
16	VÍČKO	KEZ-194-108	NEREZ	1	/
15	ŠROUB_M6X20	ISO_4762	NEREZ	12	/
14	PODLŮŽKA_7	ČSN_021703	NEREZ	12	/
13	MATICE_M6	ČSN_021401	NEREZ	12	/
12	CHLADIČ	KEZ-194-107		1	/
11	STACK	KEZ-194-106		1	/
10	TDPNÁ_SPIRÁLA_2000W			1	/
9	ŠROUB_M4X10	ČSN_021103	NEREZ	2	/
8	KRYTKA	KEZ-194-105	ALU.	1	/
7	ŠROUB_M3.5X10	ČSN_021130		2	/
6	MATICE_M5	ČSN_021401	NEREZ	4	/
5	ŠROUB_M5X15	ISO_4762	NEREZ	4	/
4	PŘÍTLAČNÝ_PLÍŠEK	KEZ-194-104	NEREZ	4	/
3	UCHYT_CHLADIČE	KEZ-194-103	NEREZ	1	/
2	SPODNÍ_DÍL_REZ.	KEZ-194-102	NEREZ	1	/
1	HORNÍ_DÍL_REZ.	KEZ-194-101	NEREZ	1	/
POZ.	NÁZEV-ROZMĚR	VÝKRES-NORMA	MATERIAL	J. MN.	HMOTN. kg
ROZM.-POZ. ROZMĚR POLOTOVAR PŘESNOST PŘESNOST					
		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ.OD TOLEROVANI ISO 8015
		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg PROMITANI
Změna		Datum	Index	Podpis	
Měřítko Pozn.		North			
1:5		Kresli	KOLUCH		
Č. seznamu		Přezkoušel			
Č. sestavy		Technolog			
Starý výkr.		Normaliz.			
Nový výkr.		Schvál			
		Datum	16.6.2011		
TU v Liberci					
TERM.-AK._MOTOR					
KEZ-194-100					
List					



Rozn.-Polot.		ROZMER		POLOTOVAR				PŘESNOST PRESNOST					
			c)		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ. OD	TOLEROVÁNÍ ISO 8015				
			b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg	PROMÍTÁNÍ 				
			a)		 TU v Liberci								
Změna		Datum	Index	Podpis									
Měřítka	Pozn.	Navrhl			Název HORNÍ_DÍL_REZ.								
1:5		Kreslil	KOLOUCH										
Č. seznamu		Přezkoušel			Typ Číslo kreslu								
Č. sestavy		Technolog											
Starý výk.		Normaliz.			KEZ-194-101								
Nový výk.		Schválil											
		Datum	16.6.2011		List								



B-B



Mat. nerez

Rozm.-Polot.		ROZMER		POLOTOVAR		PŘESNOST		PRESNOST	
				c)		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ. OP
				b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
				a)					
Změna		Datum		Index		Podpis		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
Měřítka	Pozn.	Navrhl		Kreslil		Přezkoušel		Název	
1:5		Technolog		Normaliz.		Schválil		Typ	
Č. seznamu		Datum		16.6.2011		Čís. výkresu		KEZ-194-102	
Č. sestavy								Liet	
Starý výkr.									
Nový výkr.									

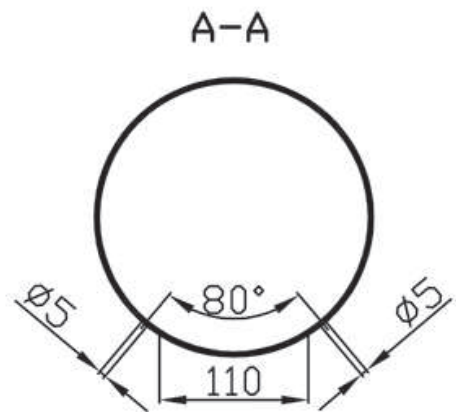
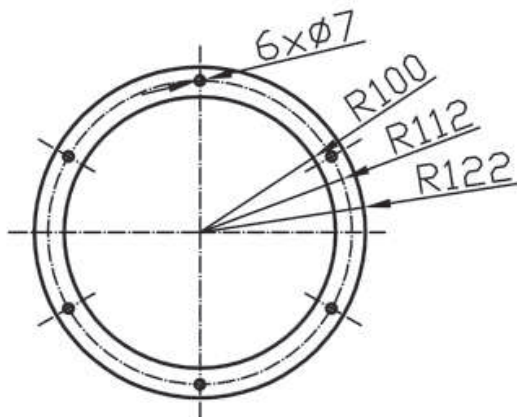
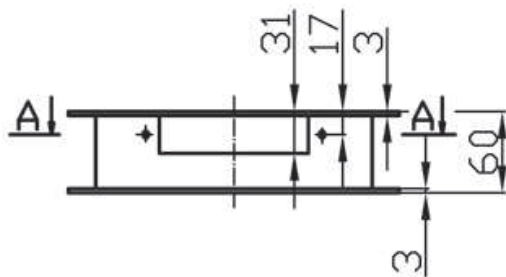


TU v Liberci

SPODNÍ_DÍL_REZ.

KEZ-194-102

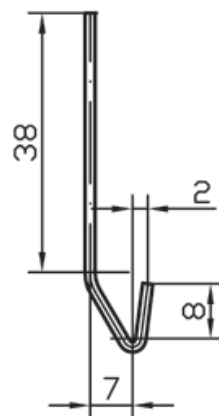
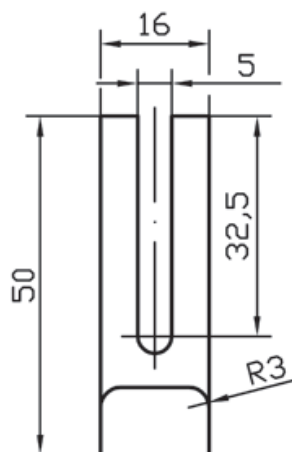
Liet



Mat. nerez

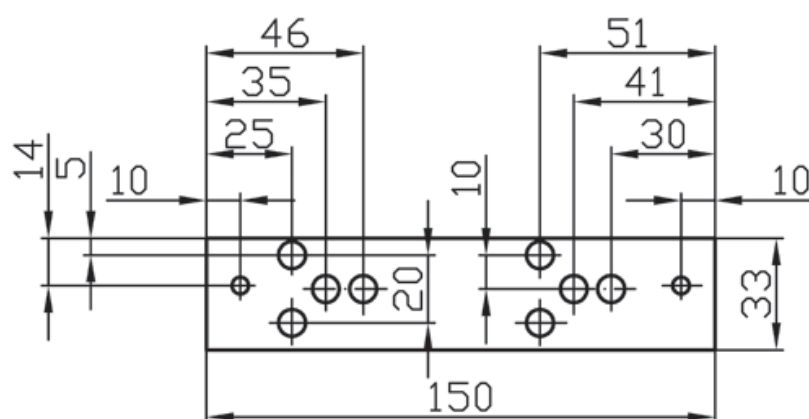
Rozm.-Polot.		ROZMER		POLOTOVAR				PŘESNOST		PRESNOST	
				c)		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ. OD	TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
				b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg	PROMÍTÁNÍ 	
				a)		<div> TU v Liberci</div> <div>Název ÚCHYT_CHLADIČE</div> <div>Typ Čís. výkresu KEZ-194-103</div> <div> List</div>					
Změna		Datum	Index	Podpisy							
Měřítko	Pozn.	Navrhl									
1:5		Kreslil	KOLDOUCH								
		Přezkoušel									
Č. seznamu		Technolog			Typ						
Č. sestavy		Normaliz.			Čís. výkresu						
Starý výkr.		Schválil			KEZ-194-103						
Nový výkr.		Datum	16.6.2011								

Liet



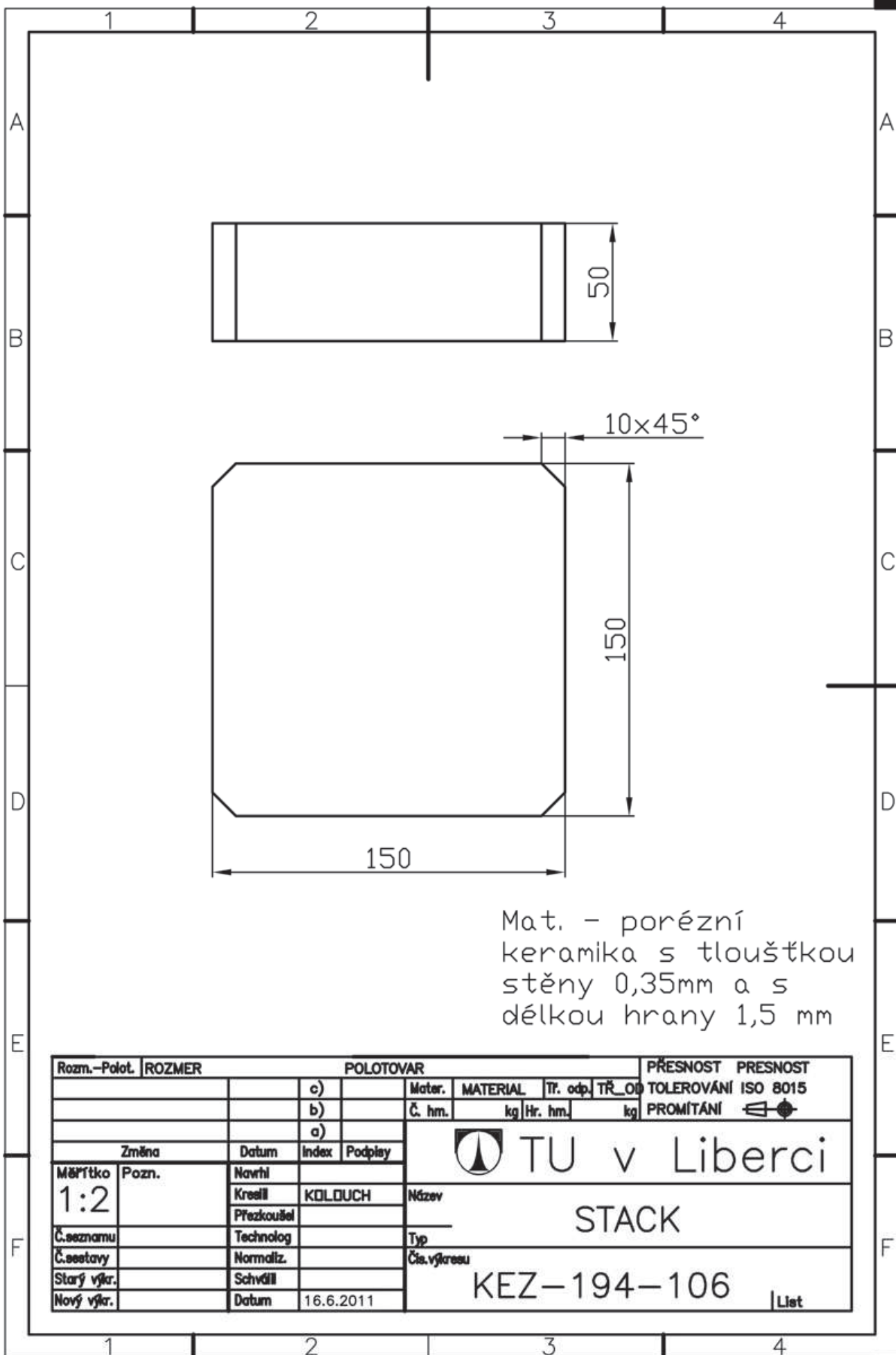
Mat. nerez
t 1,5mm

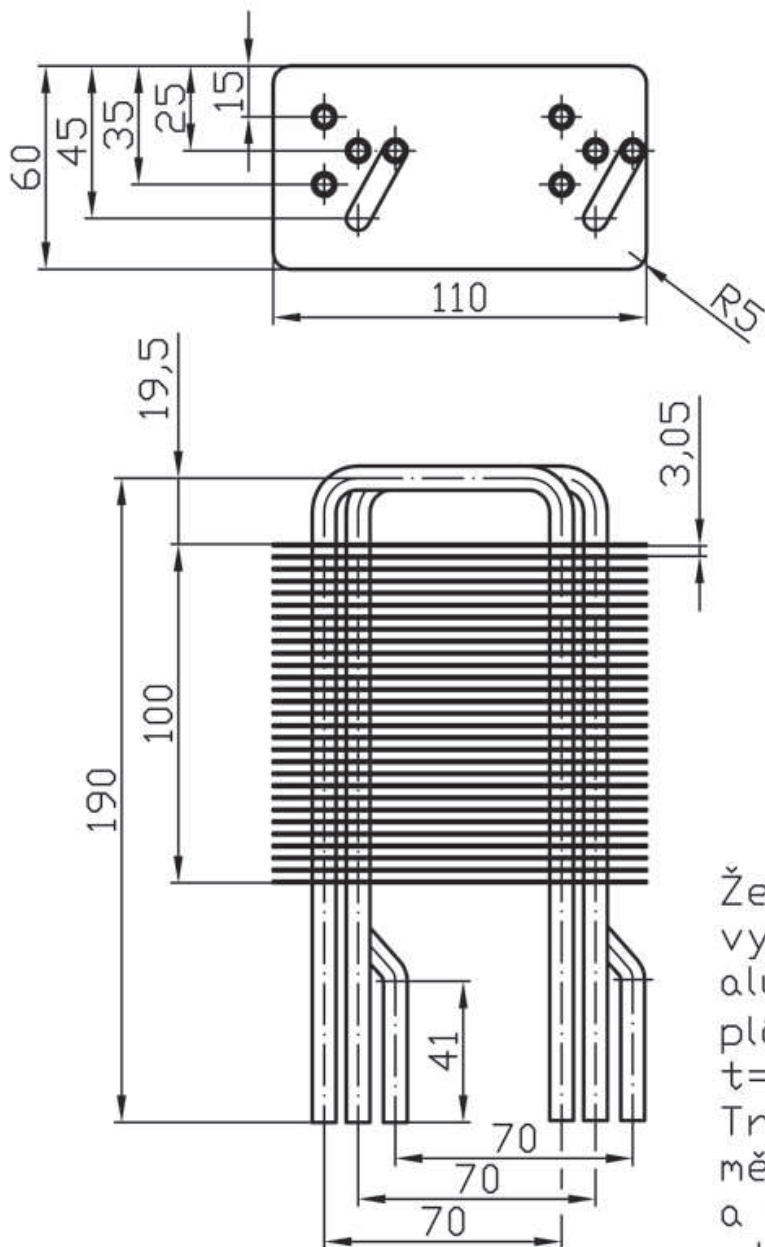
Rozm.-Polot.		ROZMER		POLOTOVAR				PŘESNOST	PRESNOST
				c)		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ. OD
				b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
				a)					
Změna		Datum	Index	Podpis	 TU v Liberci PŘÍTLAČNÝ_PLÍŠEK KEZ-194-104				
Měřítka	Pozn.	Navrhl	Kreslil	Přezkoušel					
1:1			KOLDOUCH		Typ Čís. výkresu KEZ-194-104				
Č. seznamu		Technolog							
Č. sestavy		Normaliz.							
Starý výkr.		Schválil							
Nový výkr.		Datum	16.6.2011		List				





Tloušťka plechu
 $t=0,8\text{mm/aluminium}$

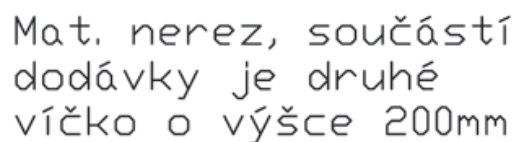
Rozm.-Polot.		ROZMER		POLOTOVAR				PŘESNOST PRESNOST				
				c)		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ. OD	TOLEROVÁNÍ ISO 8015		
				b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg	PROMÍTÁNÍ 		
				a)		 TU v Liberci						
Změna		Datum	Index	Podpis								
Měřítka	Pozn.	Navrhl										
1:2		Kreslil	KOLOUCH	Název								
		Přezkoušel										
Č. seznamu		Technolog		Typ	KRYTKA							
Č. sestavy		Normaliz.		Čís. výkresu								
Starý výkr.		Schválil										
Nový výkr.		Datum	16.6.2011		KEZ-194-105							
					List							





Žebrovaní je vyrobeno z 29
aluminiových
plátů o
 $t=0,5\text{mm}$.
Trubičky jsou
měděné s $\varnothing 6\text{mm}$
a tloušťkou
stěny 1mm.

Rozm.-Polot.		ROZMER		POLOTOVAR				PŘESNOST PRESNOST	
			c)		Mater.	MATERIAL	Tř. odp.	TŘ. OD	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
			b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg	PROMÍTÁNÍ 
			a)		 TU v Liberci CHLADIČ Typ Čís. výkresu KEZ-194-107				
Změna		Datum	Index	Podpis					
Měřítko	Pozn.	Navrhl							
1:2		Kreslil	KOLOUCH	Název					
		Přezkoušel							
Č. seznamu		Technolog							
Č. sestavy		Normaliz.							
Starý výkr.		Schválil							
Nový výkr.		Datum	16.6.2011						
					List				



KEZ-194-108

